



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

이산요소법을 활용한 기계수확 과정  
중 마늘 거동의 동적 분석

**Dynamic Analysis of Garlic Behavior during  
Mechanical Harvesting Procedure  
using Discrete Element Method**

2019년 8월

서울대학교 대학원

바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공

박 동 혁

# 이산요소법을 활용한 기계수확 과정 중 마늘 거동의 동적 분석

Dynamic Analysis of Garlic Behavior during  
Mechanical Harvesting Procedure  
using Discrete Element Method

지도교수 이 중 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2019년 6월

서울대학교 대학원

바이오시스템·소재학부 바이오시스템공학전공  
박 동 혁

박동혁의 석사 학위논문을 인준함  
2019년 7월

위 원 장                      김 기 석



부위원장                      이 중 용



위      원                      박 영 준



## 국 문 초 록

마늘은 국내의 주요 조미채소로서 많이 소비되고 있으나 농촌의 고령화로 인한 인력 부족으로 마늘 농사에 대한 부담이 커지고 있다. 그리고 마늘 관련 농작업의 기계화율도 여전히 낮기 때문에 인력을 대체하기 위한 마늘 수확기의 개발이 필요한 상황이다. 이전까지의 농기계 개발과정에서는 유한요소해석을 활용한 구조해석이 주로 이루어졌으나 이러한 방식으로는 수확 과정에 대한 성능 분석이 수행될 수 없었다. 견고한 기계를 만드는 것도 중요하지만 농민들의 입장에서 기계를 사용하였을 때 얼마나 잘 수확되는지에 대한 관심도 커지고 있기 때문에 수확 성능에 대한 분석이 점점 요구되고 있다. 본 연구에서는 이산요소법이 적용된 EDEM 프로그램을 활용하여 기계 수확 과정에서 마늘의 거동을 분석하고 수확 성능을 도출하기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

이산요소법으로 시스템을 해석하기 위해서는 입자로 해석할 물체와 그 이외의 구조물을 모델로 설정해야 한다. 마늘을 입자로 구성하여 거동을 해석하였고 마늘 수확기는 실제 설계안을 참고하여 구조물로 동일하게 나타내고 움직임에 적용하였다. EDEM에 필요한 입자의 물성으로는 크기, 밀도, 푸아송비, 탄성계수, 반발계수, 마찰계수가 있으며 이를 위해 실제 마늘의 물성을 측정하도록 했다. 생물체의 물성을 측정하였기에 결과의 편차가 크고 선행 연구와 비교하였을 때 생육 환경이나 품종 등의 차이가 있었기 때문에 물성 값에 차이는 있었지만 크게 벗어나지 않는 것으로 판단하여 측정된 수치를 마늘 입자의 물성으로 적용하여 해석하였다.

압축, 반발, 마찰 시험을 통해서 얻어진 물성 값들을 시뮬레이션에 적용하였을 때 실제 측정 실험과 동일한 해석이 이루어지는지



파악하여 수확 과정에 대한 시뮬레이션 해석의 적용성을 평가하도록 했다. 마늘 수확기로 밭에서 수확하는 과정에서 실제 마늘의 거동과 충격 등을 파악하여 시뮬레이션과 비교하는 것에는 아직 어려움이 많으므로 수확 과정에서 핵심적으로 이루어지는 롤러와 마늘의 충돌 현상을 구성하여 비교하는 과정도 수행되었다. 대체적으로 적절한 해석 결과가 도출되었으나 마찰 시험이나 충돌 가속도의 경우 해석에 차이가 크게 나타나 물성을 측정하기 위한 시험 방법이나 결과 해석 방법에 개선이 필요할 것으로 보였다.

수확 과정에 대한 시뮬레이션으로 수행되는 성능 평가를 위한 실험 조건으로 마늘과 토양 입자의 공급 조건 및 실제 밭의 조건을 참고한 수확 작업 공간을 설계하였다. 그리고 시뮬레이션 해석을 통해서 수확률, 이송 시간, 충격력, 적재 분포도, 토양 제거율이 마늘 수확기의 성능으로 분석될 수 있었다. 이를 활용해 기존의 마늘 수확기 사양과 작동 요인인 롤러의 회전속도를 향상시킨 조건, 설계 요인인 롤러의 반발계수를 향상시킨 조건에서의 수확 성능을 비교 분석을 하였다. 그 결과로 롤러 회전속도 상승은 수확률 저하를 초래하였으나 약간의 충격 감소 효과가 있었고 롤러 반발계수 상승은 이송 시간을 증가시켰지만 8.19%의 수확률 개선과 2.35%의 토양 제거율 향상이 이루어질 수 있을 것으로 해석되었다. 향후 더 상세한 검증과 다양한 조건에서의 평가를 통해서 마늘 수확기 개발과 성능 개선에 이산요소법 시뮬레이션 해석이 충분히 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

**주요어 :** 이산요소법, 거동 동적 분석, EDEM, 마늘 수확기, 마늘 물성

**학 번 :** 2017-21926

# 목 차

1. 서론 .....	1
2. 문헌조사 .....	5
2.1. 마늘 재배와 수확기계 .....	5
2.2. 마늘 물성에 관한 연구 .....	7
2.3. 이산요소법과 수확기계 적용사례 .....	9
3. 재료 및 방법 .....	13
3.1. 연구 대상의 물성 .....	13
3.1.1. 이산요소법을 위한 마늘 및 토양의 물성 .....	13
3.1.2. 공시 마늘 수확기와 기계재료의 물성 .....	17
3.2. 이산요소법 해석 시뮬레이션의 적용성 평가 .....	22
3.2.1. EDEM 시뮬레이션 프로그램 .....	22
3.2.2. 물성값 적용 평가 시뮬레이션 .....	25
3.2.3. 구근 모형과 롤러의 충돌 비교 .....	29
3.3. 수확 과정 시뮬레이션 구현 및 수확기 성능 분석 연구 ..	34
3.3.1. 토양 유무에 따른 마늘 수확 성능 .....	34
3.3.2. 설계 및 작동 요인에 따른 필드 조건 수확 성능 .....	39

<b>4. 결과 및 고찰</b>	<b>42</b>
<b>4.1. 물성 측정 결과 및 모델 구성</b>	<b>42</b>
4.1.1. 마늘 및 토양의 물성 및 입자 모델	42
4.1.2. 마늘 수확기 해석 모델	47
<b>4.2. 적용성 평가를 위한 시뮬레이션 비교 분석</b>	<b>52</b>
4.2.1. 압축시험 결과 비교 분석	52
4.2.2. 반발시험 결과 비교 분석	56
4.2.3. 마찰시험 결과 비교 분석	57
4.2.4. 롤러 충돌시험 비교 분석	59
<b>4.3. 수확 과정 시뮬레이션을 통한 수확 성능 분석</b>	<b>65</b>
4.3.1. 토양 유무에 따른 마늘 수확 성능 결과	65
4.3.2. 필드 조건에서의 요인별 수확 성능 결과	76
<b>5. 결론</b>	<b>86</b>
 <b>참고문헌</b>	 <b>89</b>
<b>Abstract</b>	<b>95</b>

## List of Figures

Fig. 1 Shape of garlic (RDA, 2014) .....	5
Fig. 2 View of live garlic (Daeseo) samples .....	14
Fig. 3 View of soil samples .....	15
Fig. 4 Garlic compression test with Texture Analyzer .....	17
Fig. 5 View of the garlic harvester .....	18
Fig. 6 Schematic of the garlic harvester and power delivery .....	19
Fig. 7 Apparatus for measuring the coefficient of restitution .....	20
Fig. 8 Apparatus for measuring the coefficient of friction .....	21
Fig. 9 Force-overlap ( $F-\delta$ ) curve of contact models, (a) Hertz-Mindlin, (b) Linear spring, (c) Hysteretic spring, and (d) Edinburgh elasto-pastic adhesion .....	24
Fig. 10 Garlic particle compression test in EDEM .....	26
Fig. 11 Garlic bulb particle compression for Poisson's ratio in EDEM (left: before, right: after compression) .....	27
Fig. 12 Collision test of garlic particle in EDEM (left: beginning, right: collision moment) .....	28
Fig. 13 Static friction test of garlic particle in EDEM (left: beginning, right: slip moment) .....	29
Fig. 14 Kinetic friction test of garlic particle in EDEM (left: beginning, right: slipping) .....	29
Fig. 15 Appearance of artificial garlic model (left: garlic bulb model, right: half model with an accelerometer) .....	31
Fig. 16 Roller and drive motor .....	33
Fig. 17 Graphical summary of collision test setup (left: acceleration, right: behavior test) .....	33
Fig. 18 Collision test of the garlic bulb model particle with the roller in EDEM .....	35
Fig. 19 Mechanical harvesting process simulation with only garlic under test condition .....	37

Fig. 20 Mechanical harvesting process simulation with garlic and soil under test condition .....	39
Fig. 21 Seed spacing (HADA, 2018) .....	40
Fig. 22 Garlic and soil particles arrangement in EDEM reflecting the field conditions with bottom view .....	40
Fig. 23 Garlic bulb particle in EDEM .....	43
Fig. 24 Particle of soil starter pack in EDEM .....	44
Fig. 25 Force-displacement curve of Daeseo garlic using Texture Analyzer · .....	46
Fig. 26 Garlic length before and after compression for Poisson's ratio measurement .....	47
Fig. 27 View of body structure geometry model .....	48
Fig. 28 View of vibration rod geometry model .....	48
Fig. 29 View of roller axes geometry model .....	49
Fig. 30 View of restitution test of garlic .....	50
Fig. 31 View of fiction test for coefficient of static friction .....	51
Fig. 32 Distance graph of friction test for sliding acceleration .....	51
Fig. 33 Force-overlap graph for Young's modulus of garlic particle in EDEM .....	53
Fig. 34 Force-displacement graph of garlic using Texture Analyzer .....	54
Fig. 35 Force-overlap graph for Poisson's ratio of garlic particle with Hertz-Mindlin contact model in EDEM .....	55
Fig. 36 Force-overlap graph for Poisson's ratio of garlic particle with EEPA contact model in EDEM .....	56
Fig. 37 Measured acceleration of the garlic model during collision experiments .....	61
Fig. 38 Acceleration determined in EDEM simulations about collision experiments reflecting the accelerometer measurement limit .....	63
Fig. 39 Comparison of experiments and simulations at the collision moment and after collision .....	64
Fig. 40 Behavior of the garlic model after collision in simulation analysis (lines), and experimental phenomena (dots) .....	65

Fig. 41 View of harvested garlic in a loading box with only garlic under test condition .....	66
Fig. 42 Not harvested garlic particles after mechanical harvesting .....	68
Fig. 43 Behavior of garlic particles and example of transfer time .....	69
Fig. 44 Result of impact force analysis on a garlic particle .....	70
Fig. 45 Impact force during mechanical harvesting with only garlic under test condition .....	70
Fig. 46 Situation with high impact force of garlic particle in the simulation .....	71
Fig. 47 Harvested garlic distribution map with only garlic under test condition .....	72
Fig. 48 View of harvested garlic in a loading box with garlic and soil under test condition .....	73
Fig. 49 Not transferred soil particles after mechanical harvesting .....	75
Fig. 50 Impact force during mechanical harvesting with garlic and soil under test condition .....	75
Fig. 51 Harvested garlic distribution map with garlic and soil under test condition .....	76
Fig. 52 Impact force during mechanical harvesting under field condition ..	78
Fig. 53 Harvested garlic distribution map under field condition .....	79
Fig. 54 Impact force during mechanical harvesting with increase of roller rotational speed .....	81
Fig. 55 Harvested garlic distribution map with increase of roller rotational speed .....	82
Fig. 56 Impact force during mechanical harvesting with increase of coefficient of restitution of roller .....	84
Fig. 57 Harvested garlic distribution map with increase of coefficient of restitution of roller .....	85

## List of Tables

Table 1 Device specifications of the GS-3AT accelerometer .....	32
Table 2 Device specifications of the DSC-RX100M6 digital camera .....	32
Table 3 Size and weight of garlic samples .....	43
Table 4 Size and weight of soil .....	44
Table 5 Physical properties of garlic and soil .....	46
Table 6 Mechanical properties of the materials (Kruggel-Emden et al., 2008) .....	49
Table 7 Collision and friction properties between samples and materials ..	52
Table 8 Coefficient of restitution result of collision test in EDEM .....	57
Table 9 Coefficient of static friction result of friction test in EDEM .....	58
Table 10 Coefficient of kinetic friction result of friction test in EDEM ...	59
Table 11 Impact acceleration of a garlic bulb based on the roller rotational speed determined experimentally and by simulation .....	63
Table 12 Result of mechanical harvesting simulation with only garlic under test condition .....	67
Table 13 Result of mechanical harvesting simulation with garlic and soil under test condition .....	73
Table 14 Result of mechanical harvesting simulation under field condition .. .....	77
Table 15 Result of mechanical harvesting simulation with increase of roller rotational speed .....	80
Table 16 Result of mechanical harvesting simulation with increase of coefficient of restitution of roller .....	83

## 1. 서론

최근 우리나라의 농촌은 인구 고령화, 노동력 부족, 인건비 상승 등의 문제에 따른 부담이 점점 커지고 있기 때문에 농업의 기계화를 촉진하기 위하여 다양한 방면으로 노력이 이루어지고 있는 상황이다. 2015년에 조사된 벼농사의 농작업 기계화율은 97.9%로 나타나 기계화가 대부분 이루어졌다고 할 수 있으나 밭농사의 농작업 기계화율은 58.3%로 낮게 나타나 개선이 필요한 것으로 보였다(Lee & Ahn, 2017). 국내의 밭농사 경작 규모는 작고 재배양식이 다양하며 토양 조건도 지역 및 시기에 따라 다양하게 나타나므로 농기계를 개발하여도 농민들에게 바로 적용되기는 어려운 상황이다.

농민들의 요구를 충족시켜 실제로 쓰일 수 있을만한 성능을 가진 농업기계의 개발이 필요하지만 중소 농기계 업체에게는 부담이 크며 자체적으로 성능을 분석하는 것도 단순하지 않다. 농기계는 기본적으로 검정을 받도록 되어 있지만 검정만으로 실제 사용 시 수확성능을 판단하는 것은 어려움이 있다. 현재의 농업기계검정은 농산물수확기의 성능으로 작업속도 및 굴취깊이, 폭, 차륜거리, 포장작업능률에 대해서만 판단하여 인증하고 있고 관련 연구에서는 수확률이나 손상률에 대해 육안으로 개수를 파악하는 방식으로 평가가 이루어지고 있다. 농민들의 입장에서는 농기계의 작업 방식에 대해 이해하고 신뢰하기 어려우며 기대하는 성능을 발휘할 수 있을지 가늠하기도 어려운 상태이다. 성능을 평가하는 입장에서라도 과정이 번거롭고 다양한 환경에 대해 평가할 수도 없기 때문에 결과를 분석하고 활용하기가 어렵다. 시제품을 제작하기 이전에 기계수확 과정에 대한 장비의 성능과 문제점을 미리 파악할 수 있는 방안을 개발하면 생산업체의 부담을 줄이고 더욱 활발한 연구를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

마늘과 양파 등의 구근류 농작물의 경우 감자 및 고구마 수확에 쓰이는



굴취 방식으로 수확이 가능하며 이러한 방식이 적용된 수확기계들이 일부 개발되어 있다. 그리고 밭농업의 주요 5종 원예작물(배추, 고추, 마늘, 양파, 무) 중 상대적으로 수확 과정의 기계화율이 높고 파종기, 정식기, 수확기 등의 농작업기 보급이 이루어지고 있어 기계화가 활발하게 진행될 것으로 전망된다(Lee & Ahn, 2017). 또한, 마늘은 양파에 비해 압축강도가 커서 충격에 강하기 때문에 작물을 굴취하여 수확하는 과정에 동력을 사용하는 기계수확 방식이 적절할 것으로 예상된다(Jun et al., 1999). 마늘수확기를 설계하고 개선하는 과정에서 시뮬레이션을 이용해 마늘의 기계수확 과정을 해석하여 수치적인 분석이 가능할 것으로 보이며 다양한 조건에 대한 분석으로 적절한 개선 방향을 도출하여 마늘 수확의 기계화를 이끌 수 있을 것이다.

일반적인 기계 시스템을 분석하기 위해 주로 활용되고 있는 유한요소법(Finite Element Method, FEM)은 하중과 경계조건이 정해진 물체를 연속체로 해석하여 응력 집중이나 변형, 공진 등의 손상 요인을 미리 예측하는 구조해석의 관점으로 주로 쓰인다(Choi, 2017). 이를 활용해 농업기계를 분석하면 장비 자체의 무게와 견인력 등을 고려해 취약한 부분이 없는지 확인할 수 있다. 작물과 관련해서는 미리 측정된 충격력을 바탕으로 내부의 변형과 압력 분포 등을 파악하기 위한 연구에 활용되었다(Dintwa, 2008). 그러나 연속체로 농작물을 해석하게 되면 한 개의 물체에 대해서 부품과 접촉했을 때의 힘과 변형을 분석할 수 있지만 이후의 거동을 실제 환경 조건으로 해석하기 어려운 문제가 있다. 개별적인 다량의 입자에 대해 외력에 의한 입자의 거동을 중점적으로 해석하는 이산요소법(Discrete Element Method, DEM)은 최근 농업 분야에서 많이 사용되고 있다. 이를 활용하면 다양한 농작업에 대해 작물의 거동이 파악될 수 있을 것이다.(Yu et al., 2015). 이를 수확작업에 적용시키면 농작업기계에 의해 작물이 어떠한 움직임을 가지며 충돌이 발생하게 될 것인지도 예측할 수 있을 것이다. 또한

토양을 실제와 유사하고 다양한 물성에 맞게 구현할 수 있어 분석의 정확성을 높일 수 있다. 기계의 구조에 관점을 두는 유한요소법과 달리 작물의 움직임을 분석하는 이산요소법을 마늘수확기에 적용해 기계수확 과정에서 마늘의 거동을 분석해보면 작물을 목표로 한 새로운 분석이 가능할 것이다.

이산요소법이 적용된 시뮬레이션 해석 소프트웨어인 EDEM(DEM Solutions LTD., UK)으로 분석을 하면 전체 해석 과정에 대한 시각적인 결과를 얻을 수 있다. 그 자체로도 분석한 일련의 작업에서 일어나는 현상에 대해 쉽게 이해할 수 있고 문제점과 그 원인을 찾아낼 수 있다. 시뮬레이션 프로그램에서는 구조물을 수정하거나 물성 및 계수들을 변경하여 다른 설계 조건 및 여러 작물 조건에 대해서도 간편하게 해석을 해볼 수 있다는 장점이 있다. 이산요소법 해석을 위해서는 입자와 구조물에 대한 적합한 물성을 부여하고 상호작용을 해석하기 위한 모델 선정과 계수 입력이 필요하다(Grima, & Wypych, 2011). 그러므로 분석하고자 하는 대상의 물성을 파악하는 것이 가장 우선적으로 이루어져야 한다. 그리고 해석의 신뢰성을 확보하기 위해서 요인분석을 통해 실제 거동과의 비교분석도 필요하다. 해석 결과로 얻어낼 수 있는 정보로는 입자의 외력 및 속도, 위치, 토크, 에너지, 구조물의 외력 및 위치, 그리고 접촉 및 결합에 대한 힘과 중첩거리 등으로 다양하다. 그러므로 여러 관점에서 농작업기계의 성능에 대한 분석이 가능하다.

본 연구에서는 롤러식 마늘 수확기의 기계수확 과정을 대상으로 하였으며 시제품의 설계 구조를 반영하였다. 롤러에 의한 충돌에 의해 주로 이루어지는 수확 과정은 이산요소법을 활용하는 시뮬레이션 해석 틀에서 접촉 이론에 따라 분석되었으나 농산물의 점탄성 특성을 완벽하게 해석해내는 것에 한계가 있고 마늘을 구형의 입자로 구성된 모델로 나타내는 과정에서도 실제 형상과 차이가 발생하며 농산물의

물성은 분포가 넓고 비등방성이기 때문에 측정하여 얻은 물성의 대푯값으로 시뮬레이션을 수행한 결과에 실제와의 차이가 발생할 수 있다는 제한점이 있다.

본 연구의 목적은 이산요소법으로 마늘 수확기를 이용한 기계수확 과정에서 마늘의 동적 거동을 분석하고 성능 도출을 위한 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 구체적으로 시뮬레이션에 필요한 마늘의 물성 측정을 선행하였다. 그리고 마늘 구근 형상의 입자 모델을 활용하여 압축, 반발, 마찰 시험 및 충돌 현상에 대해 비교 분석한 후, 마늘의 기계수확 과정에 대해 시뮬레이션을 수행하고 해석 결과를 분석하여 마늘 거동의 관점에서 제시할 수 있는 수확기의 성능을 선정하여 도출하였으며 설계 및 작동 요인에 따른 성능을 비교 분석하였다.

## 2. 문헌 조사

### 2.1. 마늘 재배와 수확기계

마늘(*Allium sativum* L.)은 가을에 파종되어 봄에 잎이 자라나며 비늘줄기가 구근형태로 비대해지고 초여름에 수확되는 호냉성 월동 2년생 초본성 식물이다. 마늘의 줄기는 단축경 형태로 퇴화되어 뿌리와 잎을 연결하고 잎은 단축경에 차례로 붙어 자라 잎집과 잎몸을 이룬다. 잎의 분화가 끝난 후 꽃차례가 분화하고 꽃대가 발달하여 줄기처럼 보이는 마늘종이 형성된다. 식용부위는 인편으로 단축경의 엽액에 착생하여 발생하고 이들이 모여 구근을 이룬다(Fig. 1). 통계청과 KREI 농업관측본부의 자료에 따르면 2017년 기준 마늘 생산량은 30만 3천 6백 톤에 이르며 1인당 소비량은 6.2kg으로 집계되어 우리나라의 식생활에서 마늘은 중요한 조미채소라고 할 수 있다. 또한 최근에 가공식품으로 소비가 증가하고 있고 기능성 식품으로서의 수요도 커질 것으로 예상된다(Lee, 2015).

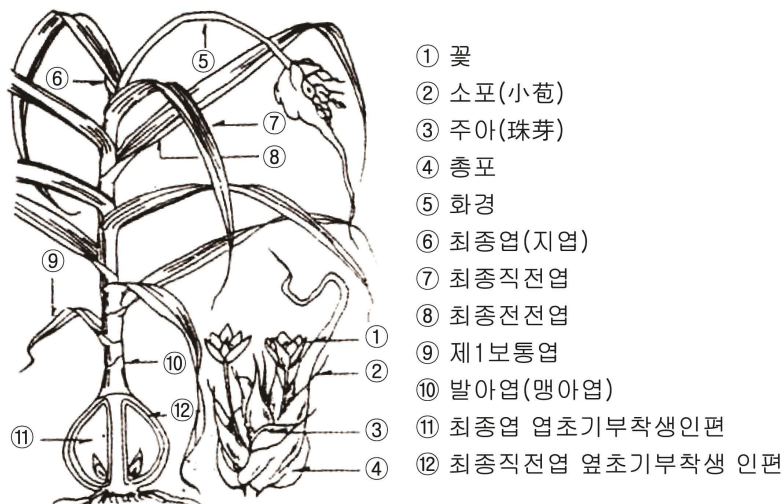


Fig. 1 Shape of garlic (RDA, 2014)

국내에서 재배되는 마늘은 크게 한지형과 난지형으로 분류되고 한지형은 우리나라 재배종으로 중북부지방에서 재배되며 난지형은 중국에서 도입된 남도마늘, 스페인 도입종인 대서마늘 등으로 남부지역에서 주로 생산된다. 한지형과 난지형의 큰 차이점은 파종시기로 한지형은 10월 중하순에 파종되고 난지형은 8월 하순에서 9월 하순까지 파종이 가능하며 난지형이 상대적으로 수확시기가 빠르다. 한지형은 휴면이 길고 저온요구도가 커 품질과 저장성이 좋은 반면, 난지형이 크기가 크고 단위 수확량이 더 높아 재배면적의 78.7%를 차지하고 있다(Kim, 2018).

마늘은 주로 평지나 완경사지에서 평두둑을 형성하여 재배하며 농촌진흥청(RDA, 2014)에 따르면 심는거리에 따라 좁게 심으면 단위면적당 수량은 증가하지만 마늘통이 작아지는 경향이 있어 120 cm 이랑에 고랑의 폭은 30-40 cm로 하며 조간간격 20cm, 주간간격 10 cm에 5-7 cm 가량 복토하는 것이 알맞을 것이라고 한다. 그렇지만 주산단지마다 다르고 기계수확을 위해서는 조간간격 12-14 cm, 주간간격 7-15 cm 정도로 하는 것이 유리하다. 통계청 자료에 의하면 2017년 기준 마늘의 생산비는 27,220 원/10 kg이고 그 중에서 노동비가 14,285 원/10 kg으로 전체 생산비의 52.5%를 차지한다. 노동의 비중이 높은 만큼 마늘 재배시 농민들이 느끼는 부담이 크기 때문에 마늘 농작업의 기계화에 대한 요구가 많다. 마늘 재배의 주요작업을 일관기계화 하였을 때 관행에 비하여 한지형 마늘의 경우 88%, 난지형 마늘의 경우 85%의 노동투하시간이 절감되어 효과가 큰 것으로 나타났다(NIAE, 2006).

마늘재배 관련 농기계는 마늘 파종기, 마늘 수확기, 마늘 줄기절단기, 마늘 뿌리절단기, 마늘쪽 분리기, 마늘쪽 선별기, 마늘 탈피기, 마늘주아 선별기, 마늘 건조기 등으로 나눌 수 있다. 농업기술실용화재단을 통해 농기계 검정을 받아 성적을 공개하고 있는 기계 중 마늘 수확에 쓰일 수 있는 땅속작물수확기로 분류되어 있는 제품은 2018년을 기준으로 11개

기종이 있다(FACT, 2018). 부착원동기 형식에 따라 경운기 부착형, 트랙터 부착형으로 나뉘며, 굴취 및 흙분리 방식에 따라 진동굴취날식, 회전날식, 체인컨베이어식, 진동봉식 등이 있다. 효과적인 수확을 위해서는 작물손상과 흙 분리를 고려하여 적절한 범위의 작업속도로 운용하고 수분이 없는 상태의 포장에서 작업하도록 해야 한다(Yoon, 2006). Choi et al.(2004), Kang et al.(2014), Lee & Min(2015)의 연구에서는 수확기의 성능 평가를 진행하였으며 관행적인 방식으로 작업폭과 작업속도를 바탕으로 작업능률을 계산하고 절단율, 굴취율, 손상률, 절단길이, 뿌리흙틸림 등을 파악하였다. 각자의 지역에서 개별적인 실험 조건으로 테스트가 진행되어 실험의 재현성을 확보하기는 어려운 것으로 보였다. 성능평가 결과는 대략적인 기준으로 판단되었으며 낮은 성능에 대하여 원인 및 개선 방향이 구체적으로 분석되지는 못하였다.

## 2.2. 마늘 물성에 관한 연구

마늘의 물성은 식물체로서의 물성, 구근으로서의 물성, 인편으로서의 물성이 달라진다. 품종이나 재배지역, 함수율 등 다양한 요인에 의해서도 물성은 영향을 받는다. 파종, 수확, 저장, 선별, 가공 등 다양한 공정을 설계할 때 대상 농산물의 물성에 대한 이해가 필요하기 때문에 다양한 작물과 공정에 대한 물성 연구는 꾸준히 이루어지고 있다.

물성을 측정하기 위한 해외의 연구로 Haciseferoğlu et al.(2005)은 식품으로서 마늘의 영양학적, 공학적 물성을 상세히 분석하였다. 물리적인 성질로는 기하학적인 크기와 부피, 무게와 개수, 구형률, 진밀도, 산물밀도, 공극률, 종단속도, 경도, 정지마찰계수, 동마찰계수를 측정하여 제시하였다. 생물체는 생장 환경에 따라 물성에 차이가 존재하므로 국내의 마늘과 차이가 있겠지만 개략적인 물성의 수치와

분포를 확인할 수 있다. 구근의 직경은 46.51 mm, 구근의 무게는 32.81 g으로 측정되었으며 마늘 작물의 밀도를 1054 kg/m<sup>3</sup>으로 제시하였다. 그리고 마늘과 철판 사이의 정지마찰계수는 0.416, 동마찰계수는 0.352로 측정되었다.

González-Montellano et al.(2012)은 이산요소법에서 접촉을 해석하는 Hertz-Mindlin 모델에 필요한 입자 밀도, 탄성계수, 반발계수, 마찰계수를 옥수수과 올리브를 대상으로 측정하고 통계적인 평가를 수행하였다. 시뮬레이션을 수행할 때에 필요한 물성 정보가 문헌에는 부족하고 표준화된 절차가 없다는 것을 지적하였고 단순히 값을 추정하여 적용하면서 현실과는 다른 모델이 된다고 하였다. 생물체에 내재된 불균일성에 의해 결과의 분산이 크게 나타나지만 연구에서 제시된 기계적 물성을 이산요소법에 쓰일 모델의 입력 매개 변수에 적용하면 시뮬레이션 결과를 보정하는 것에 도움이 될 것이라고 하였다.

국내에서는 Noh et al.(1999), Park et al.(2001)이 마늘 파종기, 수확기 개발을 위해 국내의 마늘에 대한 물성 연구를 진행하였다. 마늘 구근의 직경은 48-51 mm, 줄기의 직경은 5.65-8.10 mm로 측정되었다. 그리고 난지형과 한지형 마늘을 구분하여 Universal Testing Machine, Texture Analyzer를 이용해 압축, 인장 시험을 하였다. 압축, 인장력과 압축, 인장거리의 관계를 얻어 마늘의 압축강도, 마늘 줄기의 인장강도, 한계 변형거리 등을 도출하였다. 한지형이 압축강도가 크게 나타나 기계 수확에 적합할 것으로 보았으며, 압축방향에 따라 압축강도가 다르게 나타나는 결과를 보였다. 생물체의 비등방성 특성을 확인할 수 있었고 장비 개발에 앞선 연구로 압축, 인장의 기본적인 물성을 측정하였다. 이산요소법을 이용하여 마늘의 예취나 이송을 연구하기 위해 마늘 줄기의 탄성계수와 결합력, 마늘 구근의 탄성계수와 마찰계수, 푸아송 비 등이 모두 알려져 있지는 않지만 다른 농산물에 적용된 방법을 참고하여 마늘의 물성을 구하도록 할 것이다.

## 2.3. 이산요소법과 수확기계 적용사례

이 연구에서 활용되는 EDEM은 구형으로 구성된 입자와 육면체, 원통, 평면의 구조물로 형상을 구현하여 이산요소법으로 그것들 간의 접촉, 마찰, 결합 등을 이론 모델에 따라 계산하여 입자의 거동을 해석하게 된다. 기본적으로 재료들의 푸아송 비( $\nu$ ), 밀도( $\rho$ )와 전단계수( $G$ ) 혹은 탄성계수( $E$ )를 설정하고 그 특성을 가지는 입자와 구조물의 크기, 위치 그리고 구조물의 움직임을 설정할 수 있다. 입자들 간 및 입자와 구조물 사이의 상호작용을 해석하기 위해서는 반발계수( $e$ ), 정지마찰계수( $\mu_s$ ), 구름마찰계수( $\mu_r$ )를 입력하도록 되어 있다. 수확 작업에서 핵심적으로 해석해야 할 부분은 작물과 장비 구성품 간의 접촉과 이로 인한 충격 및 거동이다. EDEM에서 제공하는 접촉 모델은 Hertz-Mindlin, Linear Spring, Hysteretic Spring, Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion이 있다. 위 모델들은 변형량과 반발력 간의 관계를 설명하는 수식으로 구성되어 있으며 선형과 비선형, 탄성과 소성의 특징 차이를 가지고 있다. 실제 재료에 따라 나타내는 특성이 다르기 때문에 가장 가깝게 구현하는 모델을 선정하여야 한다. 농산물은 대부분 점탄성의 특징을 보이는데 주로 낙하시 발생하는 변형과 반발력의 그래프를 해석하여 점탄성의 특징을 파악할 수 있다. 같은 방식으로 시뮬레이션을 수행하여 변형량과 반발력의 관계 그래프를 구하고 비교하여 적합한 모델을 선정할 수 있다. 접촉 모델의 수식은 재료의 푸아송 비, 탄성계수, 입자의 곡률반지름, 질량에 의해 대부분 정의가 된다. 모델에 따라 감쇠계수, 강성계수, 접촉 가소성비 등을 조절하여 일부 수식의 결과를 바꿀 수 있어 최적의 모델로 개선할 수 있다(DEM Solutions, 2018). 실제와 같은 결과를 보이려면 실제로 측정된 수치를 적용하는 것이 올바를 수 있으나 기하학적인 차이나 측정방식의 오류 등이 있을 수 있어 해석 결과로 나타난 거동을 바탕으로 실제와 유사하도록 변수를 적절하게 보완하도록 할 것이다.



식물체에 대한 시뮬레이션 적용 연구로 Rumsey & Fridley(1977)는 과일 및 채소에 접촉으로 인해 가해지는 응력의 분포를 파악하고자 유한요소법으로 해석을 하였다. 농산물은 점탄성의 거동을 하는 것으로 알려져 있어 시간에 관한 지수함수로 구성된 전단계수 모델을 적용하였고 시간에 따른 응력의 변화가 실제와 비슷하게 해석된다는 것을 확인하였다. 점탄성 모델을 적용해 내부의 응력 분포의 변화를 확인할 수 있었으며 탄성 모델의 결과와 비교해 최대 응력은 작은 변위 내에서 큰 차이가 없다고 보았으나 도달 시간은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

Wojtkowski et al.(2010)은 함수율에 따른 유채씨의 접촉 응력을 이산요소법에 탄소성 모델과 점탄성 모델을 적용하여 해석하고 평가하는 연구를 수행하였다. 실제 유채씨를 21cm 높이에서 자유낙하 시켜 바닥에 가해지는 시간에 따른 힘의 그래프를 얻고 이와 일치하는 시뮬레이션 결과를 얻도록 해 충격 과정에서의 상세한 거동을 파악하였다. 적용된 재료 매개변수들은 문헌 값과 차이가 있지만 납득할만한 수준이고 습기가 많은 유채씨를 점탄성 모델로 해석하는 것이 더욱 적절하다는 결과를 보였다.

Leblicq et al.(2016)은 식물체 줄기를 이산요소법으로 구성하여 다수의 줄기가 압축되는 상황을 시뮬레이션하고 전체 및 개별 줄기의 압축응력과 변형률을 분석하여 접촉 모델을 평가하였다. 선형 탄성 모델과 Hertzian 접촉 모델이 줄기를 위한 관형 입자에 적용하여도 작은 변형에서 충분히 실제와 유사한 결과를 나타낸다고 하였다. 압축과정의 이력현상은 소성의 특성을 보이지만 개별 입자들의 점탄성적인 거동이 합산되면서 그러한 특성을 보이는 것을 확인하였다.

수확기계를 적용해 기계의 작동에 의한 작물의 거동을 시뮬레이션으로 분석한 연구들이 있으며 Van Zeebroeck et al.(2006a, 2006b)은 상자 내

사과의 수송과정에서 발생하는 진동에 의한 충격으로 인해 생기는 손상을 이산요소법을 활용해 분석하였다. 실제 상자 내에 사과를 여러 층으로 채워 넣고 상자를 진동시켜 사과에 가해진 충격과 멍의 깊이에 대한 관계식을 구하고 시뮬레이션으로도 동일하게 구성하여 해석한 사과에 가해지는 힘을 비교하여 검증하였다. 그리고 시뮬레이션을 통한 상세한 분석으로 진동수와 가속도, 적재 높이, 위치별 충격의 정도를 수치화한 결과를 얻었다.

Owen & Cleary(2009)는 농산물의 이송에 활용되는 스크류 컨베이어의 성능을 이산요소법으로 확인하였다. 컨베이어의 각도, 스크류의 회전속도, 호퍼 내 입자 적재량에 따라 입자의 속도, 질량 유동속도, 에너지 소실과 동력 소비량까지 분석하였다. 시뮬레이션으로 복잡한 입자의 흐름을 파악할 수 있고 작동 조건에 따라 달라지는 것을 확인했다. 측정한 질량 유동속도가 실험 수치보다 다소 적게 나타났지만 개선될 수 있을 것으로 보았으며 컨베이어 각도에 따라 유동 흐름의 특성이 변하기 때문에 성능이 달라지는 것으로 분석하였다.

Souza et al.(2018)은 유한요소해석으로 커피 가지와 수확 막대의 상호작용을 시뮬레이션하고 평가하였다. 진동하는 수확 막대에 의해 커피 가지가 움직이는 가속도와 변위를 측정하고 시뮬레이션으로 재해석하여 비교하였을 때 가속도는 3.14%만큼 크게 측정되어 비슷한 결과를 보였지만 변위는 23.3% 적게 나타나 차이를 보였다. 시뮬레이션 상에서 von Mises 응력 해석으로 얻어진 값이 열매와 가지 사이의 한계치보다 커서 수확이 가능한 것을 확인하였다.

Lim et al.(2016)은 EDEM을 이용해 땅콩수확기의 이송 효율을 계산하기 위한 시뮬레이션을 진행하였다. 땅콩의 형상을 입자로 구성하고 필요한 재료의 물성을 입력하도록 했다. 그리고 이송하는 부분인 진동체를 구현하고 기울기를 두어 진동을 발생시켜 땅콩 입자의 움직임과 질량

이동률을 측정하였다. 실제 기계에서는 시간별로 수거된 땅콩의 무게를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하도록 하였고 비슷한 기울기의 무게 변화 그래프를 얻을 수 있었다.

Yu et al.(2015)은 옥수수 탈립기 시뮬레이션을 위해서 옥수수의 형상과 낱알이 분리되는 조건을 분석하고 소프트웨어에 적용하여 탈곡률을 구하여 실제와 비교하였다. 시뮬레이션으로 탈곡된 옥수수 낱알의 위치 분포를 드럼 회전속도와 옥수수 공급량에 따라 확인할 수 있었고 드럼 회전속도 및 옥수수 공급량이 증가할수록 탈곡률이 증가하는 것은 실제 결과와 비교해 조금 낮게 계산되었지만 경향성은 일치하는 것으로 나타났다.

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1. 연구 대상의 물성

##### 3.1.1. 이산요소법을 위한 마늘 및 토양의 물성

본 연구에서 분석하고자 하는 마늘수확기의 기계수확 방식은 앞선 작업으로 비닐 피복 및 줄기 절단이 이루어진 후 마늘의 구근부가 굴취되고 별 모양 롤러에 의해 적재부로 이송되어 수확이 이루어진다. 이산요소법을 통해서 구근과 롤러, 수확기 프레임의 접촉을 주요하게 해석할 수 있으므로 시뮬레이션 내에서 마늘의 구근을 입자로 구성하고 물성을 설정하도록 해야 한다. 마늘 구근을 나타내기 위한 시뮬레이션 내에서의 모형을 위해 2016년 10월경 전북 익산 지역에 파종된 대서마늘을 대상으로 2017년 6월에 마늘 샘플(Fig. 2) 30개를 수거하여 기하학적 특성인 줄기의 길이와 직경, 구근의 길이, 높이, 폭 그리고 무게를 측정하였다. 또한, 기계수확 작업에서 마늘 이외의 주 이물질인 토양에 대한 조사도 진행하였다. 2018년 6월에 진행된 마늘수확기로 수확된 마늘과 함께 섞여있는 뭉쳐진 토양 샘플을 채취하였으며 이를 대상으로 기하학적 특성인 투영면적, 등가지름, 무게를 측정하였다. Fig. 3과 같이 샘플들을 촬영하여 그 면적을 구하고 Eq. 1을 통해 등가지름을 계산하였다.



**Fig. 2** View of live garlic (Daeseo) samples



**Fig. 3** View of soil samples

$$A_p = \frac{\pi d_e^2}{4} \quad (1)$$

where

$A_p$  projection area (mm<sup>2</sup>)

$d_e$  equivalent diameter (mm)

이산요소법 해석을 위해 필요한 기계적인 특성으로는 탄성계수와 푸아송비, 반발계수, 마찰계수가 있다. 이를 구하기 위해 Texture Analyzer(TA+Di, Stable Micro Systems, UK)와 디지털카메라(DSC-RX100M6, Sony, Japan)를 이용하였다. Texture Analyzer로는 탄성계수를 측정하였으며, 2017년 6월에 수거된 마늘 시료와 2018년 6월에 수거된 토양 시료를 대상으로 각각 30개, 5개에

대해 직경 5mm인 탐침봉을 이용해 0.2mm/s의 속도로 깊이 5mm까지 압축 시험을 진행하여 압축거리에 따른 압축력을 얻고 초기 탄성영역에서의 기울기를 이용해 Eq. 2와 같이 탄성계수를 구하였다. 시뮬레이션에서는 두 개의 서로 다른 탄성계수를 가진 입자의 접촉을 해석하는 과정에서 Eq. 3과 같이 탄성계수를 등가로 치환하기 위한 수식에 푸아송비가 적용된다. 푸아송비를 구하는 과정은 Nam et al.(2018)의 방법을 참고하였고, Fig. 4와 같이 Texture Analyzer를 이용해 각각 3개의 시료에 대해 압축 실험을 진행하였고 압축되는 방향과 수직되는 방향의 길이 변화를 디지털카메라로 녹화하여 얻은 이미지를 통해 파악하여 푸아송비를 얻도록 하였다.

$$E = \text{slope of elastic region} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/(\pi d^2/4)}{\Delta l/l_0} \quad (2)$$

where

$E$  Young's modulus (Pa)

$\sigma$  compression stress (Pa)

$\epsilon$  strain (-)

$F$  compression force (N)

$d$  diameter of probe (m)

$\Delta l$  compression distance (m)

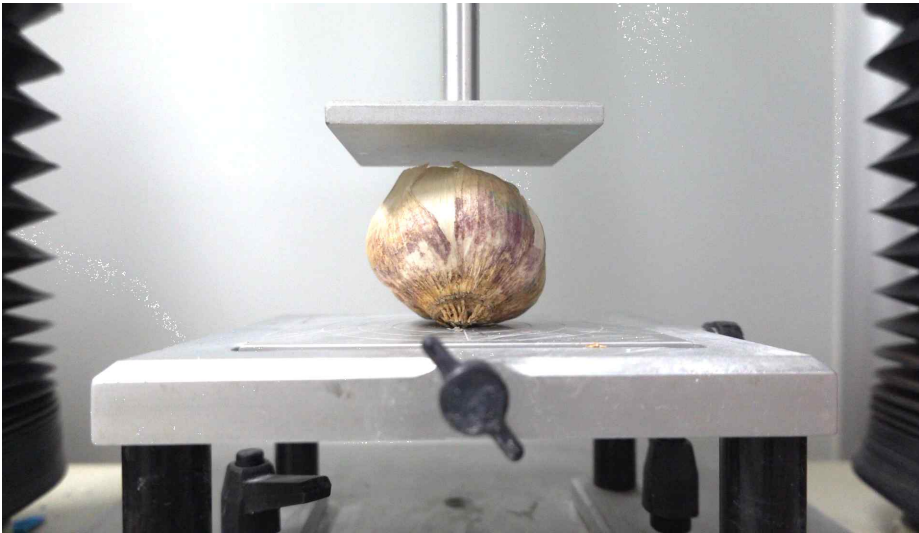
$l_0$  initial length of sample (m)

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (3)$$

where

$E^*$       equivalent Young's modulus (Pa)

$\nu$       Poisson's ratio (-)



**Fig. 4** Garlic compression test with Texture Analyzer

### 3.1.2. 공시 마늘 수확기와 기계재료의 물성

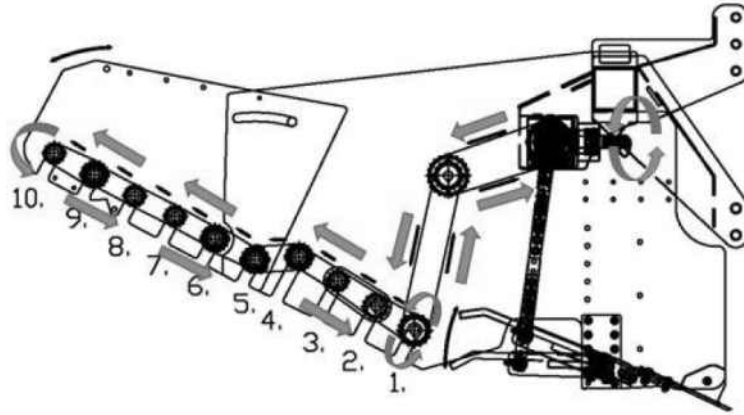
트랙터 부착식의 마늘수확기는 PTO 동력을 이용해 작업을 수행하는 장비이다. 익산 소재의 (주)하다에서 시제품을 개발하고 제품화한 마늘수확기(HADA-MH1300D, HADA, Korea)의 시제품을 대상으로 하여 기계수확 과정을 분석하였으며 형태 및 메커니즘은 Figs. 5, 6과 같다.



이를 살펴보면 마늘 수확기는 다양한 부품들로 구성되어 있으나 그 중 직접적으로 마늘 작물과 접촉하는 부분은 별모양 롤러와 주변 프레임 부분이다. 시뮬레이션으로 해석하기 위해서는 접촉하는 구성품에 대한 물성을 파악하고 적용해야 한다. 마늘 수확기의 프레임은 강철로 제작되었으며 롤러는 클로로프렌 고무로 제작되었으므로 해당 재료의 물성을 파악하였다. 그리고 시뮬레이션 해석에 적용하기 위하여 작업할 때 수확기 부품들의 작동 조건을 조사하도록 하였다.



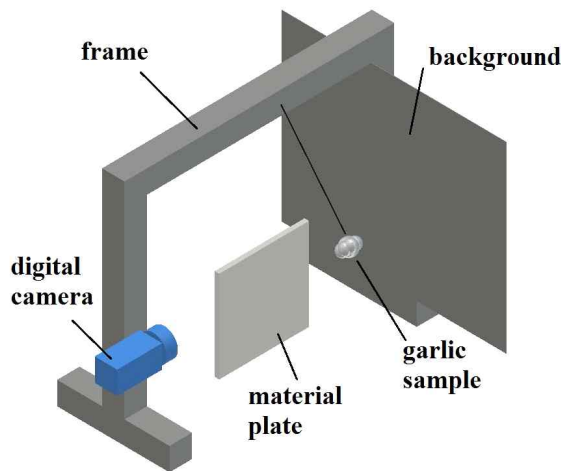
**Fig. 5** View of the garlic harvester



**Fig. 6** Schematic of the garlic harvester and power delivery

반발계수와 마찰계수는 작물과의 상호작용에서 정의되는 것으로 마늘 구근이 강철과 고무와 접촉할 때의 반발계수, 마찰계수를 실험적으로 측정하도록 하였다. 2018년 6월에 익산에서 수거된 마늘 시료 및 2019년 5월에 시중에서 구입한 대서 마늘 및 2017년 6월에 수거된 토양을 대상으로 하였다. 상호작용 관련 계수들의 측정은 González-Montellano et al.(2012)의 실험에서 쓰인 방법과 수식을 참고하여 수행되었다. 반발계수 측정은 Fig. 7의 장치와 같이 실을 이용해 구근을 프레임에 매달아 일정 높이에서 낙하시켜 재료와 충돌시키고 튕겨 나오는 과정을 카메라로 촬영해 초기 낙하 높이, 반발 높이를 구하여 반발계수를 계산하였다. 반발계수의 계산은 Eq. 4를 이용하였으며 5개 시료를 대상으로 측정하였다. 토양은 프레임에 매달기가 불가능했으며 충돌시 파괴가 일어나기 때문에 반발계수를 측정할 수 없었다. 토양은 반발이 거의 일어나지 않는 것으로 볼 수 있으므로 상대적으로 낮은 수치를 해석에 적용하도록 하였다. 마찰계수의 측정 방법은 Fig. 8과 같이 마늘을 올려둔 재료판을 서서히 경사지게 상승시키며 마늘의 움직임이 발생하는

각도를 파악하고 경사진 재료판에서 마늘이 미끄러지는 가속도를 이용해 정지, 운동 마찰계수를 도출하였다. 각각의 마찰계수는 Eqs. 5, 6을 통해서 계산하였으며 Nam et al.(2018)에서도 수행한 방식이지만 운동 마찰계수를 구하는 방법의 경우 등속도로 낙하하는 경사도를 찾는 것이 어렵다고 판단하여 기울어진 판에서 마늘이 중력에 의해 미끄러지는 과정 중 마찰에 의해 감소한 가속도를 디지털 카메라의 고속 촬영 기능으로 측정하여 마찰계수를 파악하였다. 마늘 시료를 미끄러뜨린 후 경사진 재료판에 표시된 2cm 간격의 7개 지점을 지나는 시간을 촬영한 영상의 프레임으로 파악하고 거리-시간 그래프를 그리도록 하였다. 그리고 그래프에 적합한 2차 다항식 추세선을 획득하고 이를 통해 경사지에서 시료의 가속도를 도출하도록 하였다. 마늘 구근은 3개, 토양은 5개의 시료에 대해 정지, 운동 마찰계수를 측정하고 평균 수치를 파악하였다.



**Fig. 7** Apparatus for measuring the coefficient of restitution

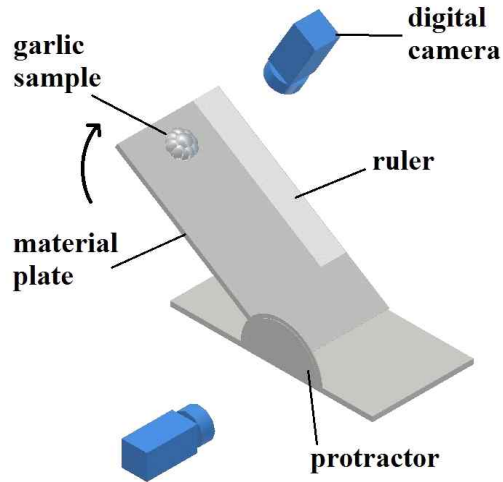
$$e = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} \quad (4)$$

where

$e$  coefficient of restitution (-)

$H_0$  initial drop height (m)

$H_1$  bounce height (m)



**Fig. 8** Apparatus for measuring the coefficient of friction

$$\mu_s = \tan \theta_s \quad (5)$$

where

$\mu_s$  coefficient of static friction (-)

$\theta_s$  slip angle (deg)

$$\mu_k = \frac{\sin\theta_k - \frac{a_s}{g}}{\cos\theta_k} \quad (6)$$

where

$\mu_k$  coefficient of kinetic friction (-)

$\theta_k$  over slip angle ( $\theta_k > \theta_s$ ) (deg)

$a_s$  slip acceleration ( $\text{m/s}^2$ )

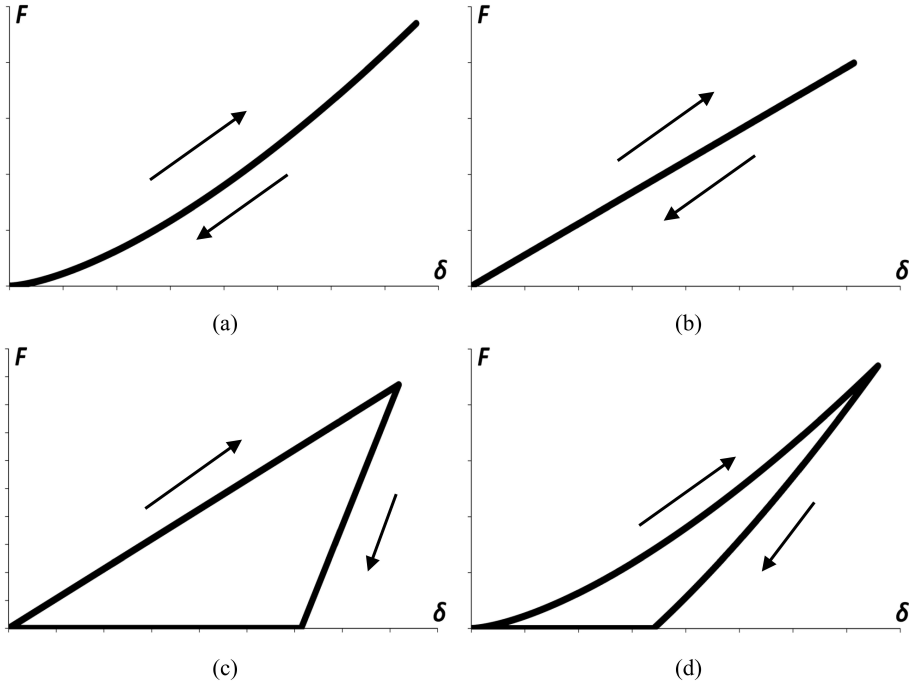
$g$  gravitational acceleration ( $g = 9.80665$ ) ( $\text{m/s}^2$ )

## 3.2. 이산요소법 해석 시뮬레이션의 적용성 평가

### 3.2.1. EDEM 시뮬레이션 프로그램

이산요소법 해석 시뮬레이션 툴인 EDEM이 연구에서 주요하게 활용되었으며 2018, 2019 버전을 사용하였다. EDEM 프로그램은 재료의 물성, 입자, 구조물, 해석 모델 등을 설정할 수 있는 Creator, 해석 시간 및 해석 과정을 확인할 수 있는 Simulator, 해석 결과에 대한 상세한 파악 및 데이터 추출이 가능한 Analyst라는 인터페이스로 구성되어 있다. 입자로 구성된 시스템을 해석하기 위해서 이산요소법이 적용되었으며 각각의 입자를 추적하기 위해서 매 순간마다 각 입자 별로 다른 입자 혹은 구조물과의 접촉을 파악해내고 접촉력을 계산하여 움직임을 예측해낸다. 접촉력을 계산해내기 위한 접촉 이론은 재료의 기계적인 특성에 따라 여러 이론이 존재하며 EDEM에서는 4개의 접촉 모델을 제공하여 다양한 재료 특성에 적절한 해석이 가능하도록 하였다. 그 4가지 접촉모델은 Hertz-Mindlin, Linear Spring, Hysteretic Spring,

Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion(EEPA) 접촉 모델이며 구형 입자와 평평한 구조물이 접촉하였을 때 Fig. 9와 같이 반발력이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 접촉 모델에 따라 압축 및 이완 과정에서 선형 혹은 비선형, 탄성 혹은 소성 변형의 특성을 나타내는 것을 알 수 있다(EDM, 2018). 비선형이며 탄성 변형의 특성을 나타내는 Hertz-Mindlin 접촉 모델은 가장 일반적인 해석 모델로서 Eq. 7을 이용해 접촉력을 도출한다. 재료의 탄성영역 내에서 충돌이 발생하는 경우에 대해 적절한 해석이 가능하므로 시뮬레이션을 평가하는 단계에서 해당 모델을 분석하도록 하였다. 그러나 마늘의 경우 압축, 이완 시험을 통해 비선형의 압축력 경향성과 이완 후에도 23%정도의 영구 변형이 남아있는 것으로 나타났다(Min & Jeong, 1997). 이와 적합한 것으로 보이는 EEPA 접촉 모델은 Eq. 8에 따라 해석이 이루어진다. EEPA 접촉 모델은 소성 변형을 나타낼 수 있고 설정에 따라 영구 변형의 비율이 달라지며 선형 혹은 비선형으로 접촉력을 해석해낼 수 있다. 따라서 마늘을 해석하는 단계에서는 EEPA 접촉 모델을 적용해보도록 하였다. 입자 및 구조물, 그리고 물성은 앞에서 제시한 모형과 수치들을 EDM내 Creator 창에서 입력하여 기본적인 해석 모델을 구성하였다. 자세한 작동 조건 및 해석 조건은 각각의 시뮬레이션에 따라 다르게 설정하고 해석하도록 하여 다양한 상황에 대해 적절한 분석을 할 수 있도록 했다.



**Fig. 9** Force-overlap ( $F$ - $\delta$ ) curve of contact models, (a) Hertz-Mindlin, (b) Linear spring, (c) Hysteretic spring, and (d) Edinburgh elasto-pastic adhesion

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

where

$F_n$  normal force (N)

$E^*$  equivalent Young's modulus (Pa)

$R^*$  equivalent radius (m)

$\delta_n$  normal overlap (m)

$$F_n = \begin{cases} f_0 + k_1 \delta^n & \text{for loading} \\ f_0 + k_2 (\delta^n - \delta_p^n) & \text{for unloading/reloading} \\ f_0 - k_{adh} \delta^n & \text{for adhesion} \end{cases} \quad (8)$$

where

$f_0$  constant adhesive strength at first contact (N)

$k_1$  loading stiffness parameter (N/m)

$k_2$  unloading/reloading stiffness parameter (N/m)

$k_{adh}$  adhesive stiffness parameter (N/m)

$\delta_p$  plastic overlap (m)

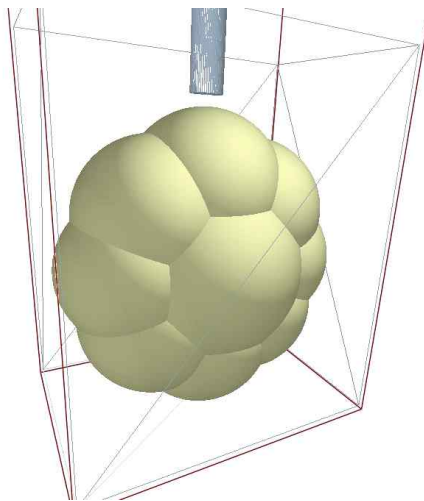
### 3.2.2. 물성값 적용 평가 시뮬레이션

마늘과 토양, 마늘 수확기의 재료들에 대한 물성을 각각의 실험을 통해서 측정하였으나 이러한 수치들이 시뮬레이션에 적용되었을 때 어떠한 영향이 있는지 파악하고 적절한 수치인지에 대한 검증을 위해서 시뮬레이션 내에서 각각의 물성 측정 실험을 재현하고 물성치에 따른 결과를 확인하도록 하였다.

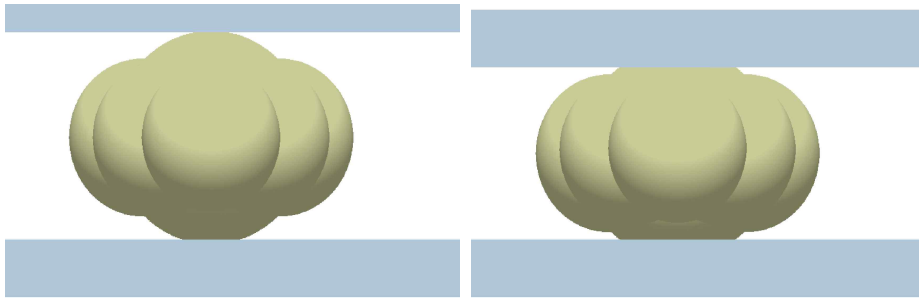
첫 번째로 탄성계수를 측정하기 위한 압축 및 이완 실험을 시뮬레이션 하였다. Texture Analyzer로 압축시험을 수행한 것과 같이 Fig. 10처럼 마늘을 고정시킨 후 직경 5mm의 강철 물성의 탐침 봉으로 0.2 mm/s의 속도로 압축시킨 후 이완하는 과정을 설계하였다. EDEM에서 재료의 항복 이후의 현상을 구현하는 것은 아직 불가능하기 때문에 마늘의 최대 압축력이 발생하는 대략적인 깊이인 2.5 mm까지 관입시키도록 하였다.



마늘 입자에는 앞에서 측정한 마늘의 물성을 적용하였고 접촉 모델은 EEPA로 설정하였으며 영구변형의 비율은 0.23으로 설정하였다. 입자의 물성 중 탄성계수는 실제 측정된 수치인 13.38 MPa이 아닌 5, 10, 15, 20 MPa을 탄성계수로 설정하여 중첩거리에 따른 압축력의 그래프를 구하고 비교하였다. 그리고 실제 마늘의 압축 실험과도 비교하여 시뮬레이션 내 마늘 모델의 탄성계수 요인을 검증하였다. 그리고 푸아송비의 영향을 파악하기 위한 마늘 구근 입자의 압축 시험도 구현하였다. 실제 푸아송비를 구하는 압축시험에서는 수직 및 수평방향의 길이 변화를 측정하였으나 EDEM에서는 입자 및 구조물 자체의 변형은 없는 것으로 해석하기 때문에 Fig. 11과 같이 수평방향의 길이 변화가 나타나지 않아 직접적으로 푸아송비를 구하고 비교하는 것은 이루어질 수 없다. 따라서 푸아송비에 연관이 있는 압축력을 파악하고 푸아송비에 따른 마늘 입자의 압축력의 차이를 파악하도록 하였다. 푸아송비는 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 설정하였고 6 mm까지 압축하였으며 압축력-중첩거리 그래프 및 최대 압축력을 비교하였다. 또한 Hert-Mindlin 접촉모델과 EEPA 접촉 모델에 대해 각각 진행하여 모델별 푸아송비의 영향을 파악할 수 있도록 하였다.

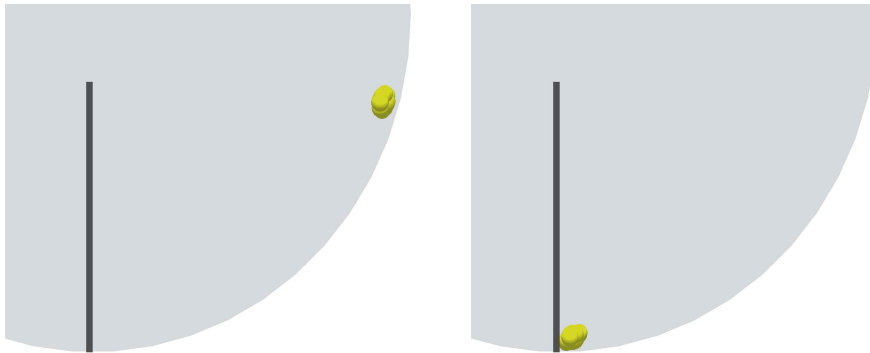


**Fig. 10** Garlic particle compression test in EDEM



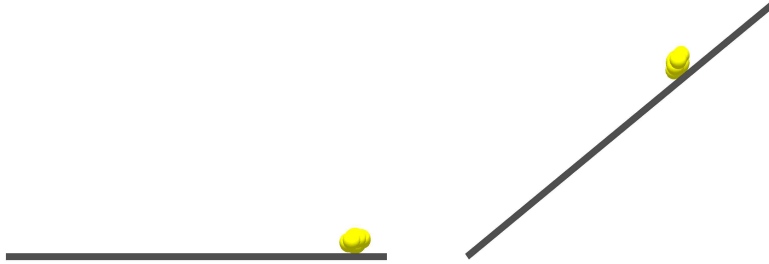
**Fig. 11** Garlic bulb particle compression for Poisson's ratio in EDEM  
(left: before, right: after compression)

두 번째로는 반발계수를 파악하기 위한 충돌 시험을 EDEM 내에서 구현하였다. Fig. 12와 같이 입자를 실에 매다는 대신 원통형 구조 내에서 낙하하도록 하였으며 자유낙하와 같이 마찰이 없도록 구조물과의 마찰계수를 0으로 하였고 원통 구조의 하단 중앙에 고정된 재료판을 배치하여 충돌이 일어날 수 있도록 했다. 입자의 형태가 단순한 구형이 아니기 때문에 충돌시 자세에 따라 반발이 다르게 일어날 수 있기 때문에 30개의 입자를 충돌시키는 시뮬레이션을 설계하였다. 재료판은 기본적으로 고무의 물성을 적용하였으며 Hertz-Mindlin 모델과 EEPA 모델에 대해 반발계수를 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5로 하여 초기 낙하 높이와 충돌 후 반발 높이를 EDEM에서 얻을 수 있는 입자의 Z방향 위치 데이터에서 파악해 반발계수를 Eq. 4를 통해 계산하고 입자 30개에 대해 평균값 및 표준편차를 구하여 비교하였다.

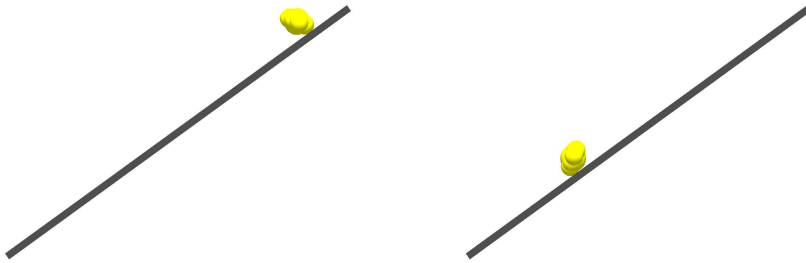


**Fig. 12** Collision test of garlic particle in EDEM (left: beginning, right: collision moment)

마지막으로 마찰계수를 위해서는 Figs. 13, 14와 같이 정지 및 운동마찰계수를 측정할 수 있도록 재료판과 입자를 구성하였다. 정지마찰계수는 정지된 상태에서 미끄러지는 순간의 각도를 파악해야하기 때문에 수평의 재료판을 반시계방향으로 0.2 rpm으로 천천히 회전시키도록 하였다. 그리고 운동마찰계수를 측정하고자 재료판을 35도 각도로 배치하고 위쪽에 입자를 잠시 멈춰둔 다음에 자유롭게 미끄러지도록 하였다. 기본적으로 앞에서 제시하였던 마늘과 고무의 물성을 적용하였고 30개의 입자에 대해 시뮬레이션을 하였으며, 정지마찰계수를 검증하기 위한 시뮬레이션에서는 정지마찰계수를 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7로 설정하였으며 EEPA 접촉 모델의 경우 평판에서 정지하고 있지 않아 미끄럼을 파악할 수 없어서 Hertz-Mindlin 접촉 모델에 대해서만 정지마찰계수를 구하여 비교하였다. 운동마찰계수를 측정하는 시뮬레이션에서는 운동마찰계수를 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4로 설정하여 Hertz-Mindlin 모델과 EEPA 모델에 대해 검증하였다. 각각 미끄러지는 순간의 재료판 경사와 미끄러지는 가속도를 EDEM 해석 데이터에서 취득하여 Eqs. 5, 6을 이용해 마찰계수들을 구하였다.



**Fig. 13** Static friction test of garlic particle in EDEM (left: beginning, right: slip moment)



**Fig. 14** Kinetic friction test of garlic particle in EDEM (left: beginning, right: slipping)

### 3.2.3. 구근 모형과 롤러의 충돌 비교

연구에서 분석하고자 하는 마늘수확기의 기계적 수확 과정은 마늘이 굴취된 후 롤러와의 충돌에 의해 흙이 제거되고 적재함으로 이동하게 되는 것이다. 롤러의 회전속도를 증가시키면 빠르게 작물이 수확되고 이물질이 원활히 제거되도록 하여 수확효율을 증가시킬 수 있다.

그렇지만 농작물의 경우 손상을 최소화하는 것도 중요하다. 마늘 수확기의 기계수확 과정에서는 마늘과 롤러와의 충돌에서 작물이 받는 힘을 바탕으로 마늘의 거동을 해석하게 된다. 그러므로 EDEM에서의 해석 모델이 마늘과 롤러의 충돌 현상을 유사하게 해석해낼 수 있는지 평가하도록 하였다. 마늘 구근의 형상은 여러 개의 마늘쪽이 모인 복잡한 형태이고 이송 과정에서의 움직임도 다양하기 때문에 충돌 조건도 매번 다르게 나타난다고 볼 수 있다. 구형 입자들로 구성된 마늘 입자와 별 모양 롤러의 충돌 요인 분석을 통한 평가를 위해 Fig. 15와 같이 마늘 입자와 동일한 크기와 형태로 모형을 제작하였다. 재료는 PLA이며 3D 프린터를 이용해 EDEM 내에서 구현된 마늘 입자와 동일한 형상으로 만들었다. 그리고 가속도계를 부착할 수 있도록 절반의 모형을 따로 제작하여 결합시켰다. 각각의 무게는 28.55 g, 78.01 g이며 이를 시뮬레이션에 적용하여 마늘과 동일한 형태인 PLA 모형의 충돌 후 거동을 시뮬레이션으로 해석이 가능한지 판단하도록 하였다. 부착된 가속도계(GS-3AT, GRAPHTEC, Japan)는 3축 가속도 센서로 데이터로거(GL100, GRAPHTEC, Japan)에 연결하여 최소 저장간격인 5ms마다 데이터를 수집하도록 하였다. 가속도계의 사양은 Table 1과 같다. 가속도계에는 측정 가속도 범위가 존재하며 각 축별로 100 m/s<sup>2</sup>까지의 가속도만 계측이 되며 그 이상의 가속도에서는 100 m/s<sup>2</sup>으로 나타난다. 충돌 현상의 상세한 거동을 파악하기 위해서 Table 2와 같은 성능의 디지털카메라 (DSC-RX100M6)의 고속 촬영 기능도 활용하였다. NTSC 모드에서 XAVC S HD: 24p 50M(1920×1080/960fps)의 조건으로 약 1ms당 하나의 이미지를 얻을 수 있도록 하여 마늘 모형과 롤러의 충돌 상황을 영상으로 촬영하고 이미지를 획득하였다. 마늘 모형과 충돌시키는 롤러는 마늘 수확기에 실제 적용되며 클로로프렌으로 제작된 Fig. 16의 부품을 사용하였으며 입력 전압에 비례하여 모터 회전수를 출력하는 소형DC기어드 모터(XD-25GA370, SMG, China)에 결합하여 사용하였다. 모터에 롤러를 결합하였을 때 롤러의 회전속도는 Eq. 9와 같이 유도될

수 있는 것으로 파악되었다. 이를 통해 전압으로 롤러의 회전속도를 조절하였으며 100, 150, 200 rpm의 조건으로 가속도 및 거동 분석을 위한 충돌 실험을 수행하였다. 가속도계를 모형에 결합하여 가속도를 측정하는 실험과 완전한 모형을 충돌시키며 디지털카메라로 촬영하여 거동을 파악하는 실험을 진행하였으며 Fig. 17과 같이 실험 장치를 구성하였고 20 cm의 길이를 두고 모형을 프레임에 매달도록 했다. 충돌 과정의 30초에 대해 가속도를 측정하였으며 3축 방향으로 나타나는 가속도 값을 Eq. 10을 통해 벡터합으로 구하였으며 이를 그래프로 나타내 전체적인 충돌 현상을 파악하였다. 그리고 Eq. 11을 통해 30초간의 충돌 현상에서 나타난 가속도의 Root Mean Square(RMS)를 계산하였으며 이를 바탕으로 수치적인 비교도 가능하도록 했다.



**Fig. 15** Appearance of artificial garlic model (left: garlic bulb model, right: half model with an accelerometer)

**Table 1** Device specifications of the GS-3AT accelerometer

Term	Description
Type of measurement	Tri-axial acceleration ( <i>X</i> -, <i>Y</i> -, and <i>Z</i> -axis) and Temperature
Measurement range (m/s <sup>2</sup> )	±20, ±50, ±100
Accuracy (%)	±2
Response (Hz)	0–100
Measuring capacity	16, 32, 64, and 128 k samples
Sampling interval (ms)	5, 10, 20, 50, 100
Dustproof and waterproof	IP54
Operating temperature (°C)	-10 to 50
Operating Humidity (% RH)	< 80
External dimension, W × D × H (mm)	51 × 36 × 20
Weight (g)	64

**Table 2** Device specification of the DSC-RX100M6 digital camera

Term	Description
Sensor type	13.2mm×8.8mm Exmor RS™ CMOS
Focal distance (mm)	24 – 200
Aperture ratio	F 2.8 – 4.5
ISO film speed	125 – 12800
Shutter speed	30" – 1/2000
Power	DC 3.6V, DC 5.0V
External dimension, W × D × H (mm)	101.6 × 58.1 × 42.8
Weight (g)	301



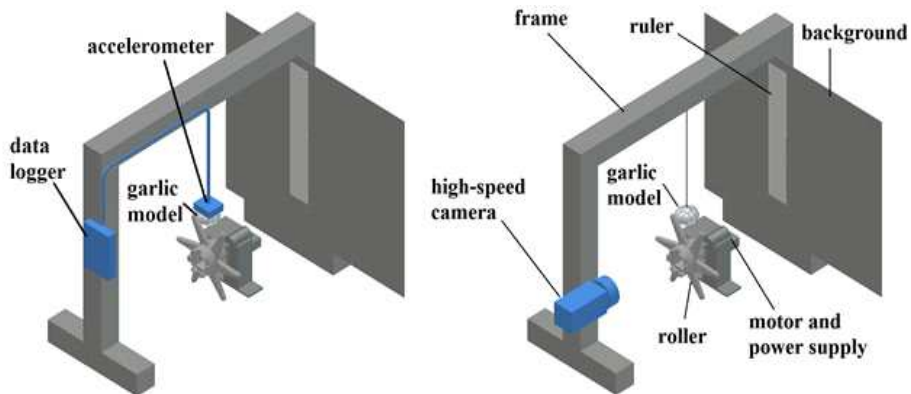
**Fig. 16** Roller and drive motor

$$\omega_r = 18.081 V_{in} - 7.611 \quad (R^2 = 0.9998) \quad (9)$$

where

$\omega_r$  rotational speed of roller (rpm)

$V_{in}$  input voltage of motor (V)



**Fig. 17** Graphical summary of collision test setup (left: acceleration, right: behavior test)



$$a_{sum} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (10)$$

where

$a_{sum}$  sum of acceleration (m/s<sup>2</sup>)

$a_x$  X-axis acceleration (m/s<sup>2</sup>)

$a_y$  Y-axis acceleration (m/s<sup>2</sup>)

$a_z$  Z-axis acceleration (m/s<sup>2</sup>)

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_i (\Delta t \times a_{sum,i}^2)}{T_{total}}} \quad (11)$$

where

$a_{rms}$  RMS acceleration (m/s<sup>2</sup>)

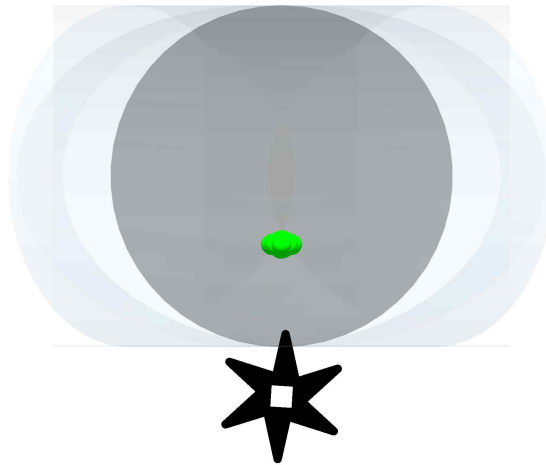
$\Delta t$  time interval (s)

$a_{sum,i}$  sum of acceleration at the  $i$  th time (m/s<sup>2</sup>)

$T_{total}$  total time of measurement (s)

EDEM에서는 Fig. 18과 같이 225 mm 반경의 구조 내에 마늘 모형 입자를 배치하여 실에 매여 이탈하지 못하는 실제 조건을 구현하도록 하였다. 그리고 하단에 물리를 배치하여 충돌로 날아간 입자가 다시 낙하하여 연속적인 충돌이 일어날 수 있도록 하였다. 모형의 충돌 현상 시물레

이션을 평가하기 위한 것이기 때문에 롤러의 물성은 고무로 적용되었으며 입자의 경우 마늘이 아닌 PLA의 물성인 탄성계수 3.5 GPa, 반발계수 0.6로 적용하였고(UL, 2018) 무게는 완전 모형의 경우 28.55 g, 가속도 측정 모형의 경우 78.01 g으로 설정하여 실험과 동일한 조건으로 가속도 분석 및 거동 분석 시뮬레이션을 해석하도록 하였으며 실험 결과 분석 방법과 동일한 방식으로 EDEM에서 얻은 결과를 분석하여 비교하였다.



**Fig. 18** Collision test of the garlic bulb model particle with the roller in EDEM

### 3.3. 수확 과정 시뮬레이션 구현 및 수확기 성능 분석 연구

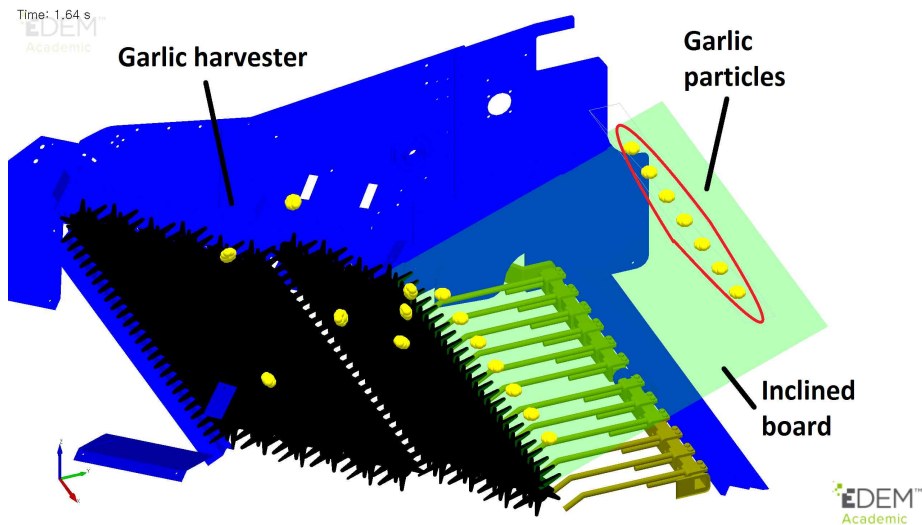
#### 3.3.1. 토양 유무에 따른 마늘 수확 성능

마늘 수확기를 EDEM 내에서 구현하기 위해서 크게 본체 구조, 진동봉, 롤러 축의 세 파트로 구조물이 적용되었으며 각각의 움직임은 실제 제품의 작동 조건에 기초하여 적용되도록 하였다. 세 파트로 나누어진

이유는 각각의 움직임이 다르고 롤러의 경우 재질도 다르기 때문에 프로그램 내에서 각각의 구조물로 구성하여 서로 다른 물성 및 움직임이 설정되도록 하였다. 전체 구조물의 이동 속도는 마늘 수확기의 목표 작업 속도인 1 km/h를 적용하여 0.2778 m/s로 설정하여 작업 방향으로 전체 파트가 같이 이동하도록 했다. 진동 봉은 좌, 우 2개로 구성되어 있으며 번갈아가며 진동할 수 있도록 180도의 위상차를 두었으며 변위 18.9도, 주파수 8.1 Hz의 조건으로 반복 회전운동을 부여해 상하진동이 발생할 수 있도록 했다. 롤러 축의 회전속도는 PTO 540 rpm 조건에서 중간 동력 전달 과정의 기어비를 거치며 250 rpm으로 감속된다. 시뮬레이션에서도 10개의 롤러 축이 250 rpm으로 회전하면서 이동하도록 하였다. 각 파트는 마늘 수확기 설계안에서의 상대적인 위치와 동일하게 배치하여 실제 마늘 수확기의 구조와 작업 조건을 유사하게 구현하도록 했으며 마늘 및 구조물 재료, 상호작용의 물성들은 앞에서 측정된 수치를 바탕으로 하여 시뮬레이션을 구성하였다.

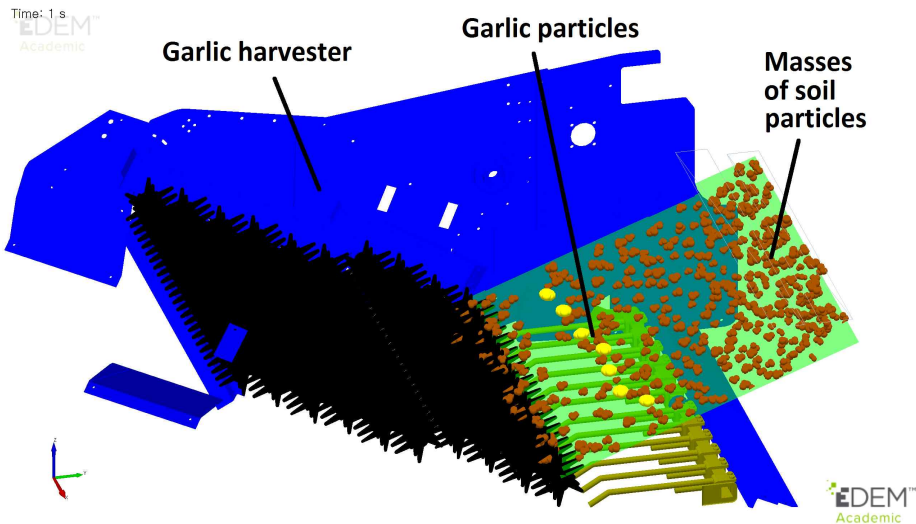
마늘 수확기의 성능 분석을 위한 시뮬레이션은 크게 테스트 조건과 필드 조건으로 나누었다. 테스트 조건은 실제 작업 환경이 아닌 실험실과 같은 조건에서 인공적으로 마늘 및 토양 등을 공급하여 환경에 영향을 받지 않는 특정 조건을 의미한다. Lee et al.(2018)의 연구에서는 EDEM을 이용해 마늘 수확기에 마늘을 개별적으로 공급하여 이송 시간을 측정하였다. 토양이 포함되지 않고 실제 밭의 조건과는 달랐지만 롤러의 회전속도에 따른 이송 시간의 성능 변화를 확인하게 파악할 수 있었다. 실제 작업에서의 마늘 이송 시간과는 다를 수 있지만 마늘 수확기 자체의 성능을 판단하기에는 적합한 것으로 보였다. 이를 참고하여 경사판을 따라 마늘이 일정하게 롤러로 이송될 수 있도록 구상하였다. Fig. 19와 같이 마늘 입자를 공급하기 위한 경사판을 배치하였으며 0.54초마다 7개의 마늘이 나란히 생성되어 1열로 공급되도록 하였다. 총 140개의 마늘이 생성되도록 하였고 적재함까지

완전히 이송될 수 있도록 이송부에 마늘이 남아 있지 않은 것을 확인하며 20초 전후의 시간에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과 데이터는 1ms 간격으로 저장되도록 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서 마늘 수확기의 성능으로 분석된 항목은 수확률, 이송 시간, 충격력, 적재 분포도이다. 수확률은 전체 생성된 마늘 입자 중 뒤에 배치되는 적재함에 담기는 마늘 입자의 비율이다. 이송 시간은 마늘이 생성된 후 적재함에 도달하는데 걸리는 시간이다. 충격력은 롤러 이송 구간 내에서 발생하는 입자와 구조물의 접촉력을 파악하여 평균값을 구한 것이다. 적재 분포도는 한 변이 1450 mm인 정사각형 형태의 적재함을 5×5 구간으로 나누어 구간 별로 적재된 마늘 입자의 분포를 나타낸 것이다. 그리고 각각의 성능을 파악하면서 나타난 성능 하락의 원인이 될 수 있는 상세한 특이사항을 제안하도록 했다.



**Fig. 19** Mechanical harvesting process simulation with only garlic under test condition

토양을 적용하는 테스트 조건은 기본적으로 앞에서의 시뮬레이션 설계 방안과 동일하다. 위의 조건에서 토양 입자를 추가하였으며 이물질이 추가되면서 마늘의 입자 거동에 방해가 발생하기 때문에 전체적인 성능에 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 토양을 추가한 시뮬레이션도 수행하여 결과를 파악하도록 하였다. 그러나 실제로 성능 평가를 하고자 시험 공간에서 토양을 다량으로 공급하며 마늘 이송을 파악하는 것은 불편할 수 있으며 실제로 밭에서 수확하는 것이 더 적합할 수 있다. 그러나 마늘만으로 분석하는 테스트 조건과 필드 조건 모두와 비교하기 위해서 토양을 적용하여 분석하도록 하였다. 토양은 초당 5.556 kg의 양이 균일하게 만들어지도록 하였으며 경사판에서 생성하여 마늘 입자와 같이 롤러에 공급되도록 하였다. Fig. 25와 같이 마늘과 토양 입자들이 같이 공급되도록 한 것이다. 마늘 밭의 표면에 1m당 약 20kg의 토양이 분포하는 것으로 파악되어 이를 참고하여 토양을 생성하였으며 토양은 표준편차를 적용하여 동일하지 않은 크기로 생성되도록 하였기 때문에 무게를 기준으로 생성되도록 하였다. 토양이 적용되어 같이 해석되는 시뮬레이션에서는 수확률, 이송 시간, 충격력, 적재 분포의 성능에 토양 제거율도 추가로 분석하였다. 전체 생성된 토양 질량 중 마늘이 수거되는 적재함에 도달하지 않은 토양의 비율을 나타낸다.

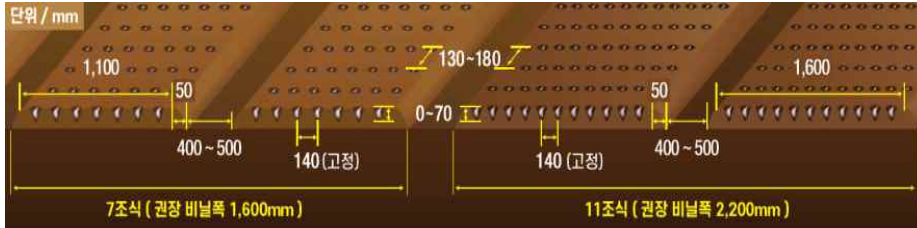


**Fig. 20** Mechanical harvesting process simulation with garlic and soil under test condition

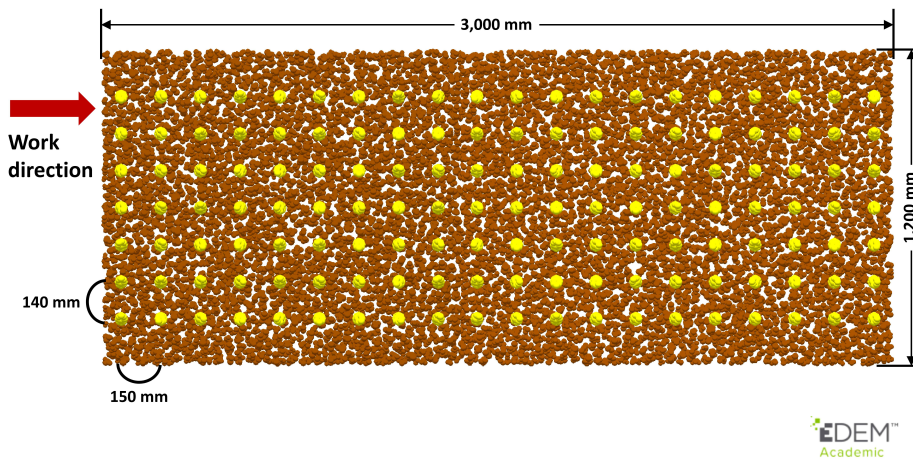
### 3.3.2. 설계 및 작동 요인에 따른 필드 조건 수확 성능

필드 조건의 경우 마늘 밭의 마늘 파종 간격을 참고하여 일정한 양식으로 토양과 작물을 위치시키도록 설계하였다. Fig. 21은 (주)하다에서 판매하는 마늘파종기의 파종 양식으로 농촌진흥청에서 제시한 기계수확에 적합한 조건, 주간간격의 범위에 포함된다. 마늘 파종의 기계화가 이루어지면서 마늘 밭의 표준 규격도 이와 같이 통일될 수 있을 것으로 예상된다. 이 규격에 따라 7조식으로 조간간격 140 mm, 주간간격 150mm를 적용하여 20줄로 140개의 마늘 입자를 배치하였으며 토양은 가로 1,200 mm, 세로 3,000 mm의 밭을 대신하는 사각 공간 내에 60kg의 양을 고르게 생성하여 배치하였다. 시뮬레이션 내에서 구성된 마늘과 토양 입자는 Fig. 22와 같다. 이처럼 배치된 가상의 필드 공간을 마늘 수확기가 지나가며 수확할 수 있도록 시뮬레이션을 구성하였다. 본 시뮬레이션 결과에서도 수확률, 이송 시간, 충격력, 적재 분포, 토양

제거율을 도출하였으며 테스트 조건의 결과와 비교하도록 했다.



**Fig. 21** Seed spacing (HADA, 2018)



**Fig. 22** Garlic and soil particles arrangement in EDEM reflecting the field condition with bottom view

마늘 수확기에서 가장 핵심적인 작동 요인으로 롤러의 회전속도를 꼽을 수 있다. 롤러는 마늘 및 토양과 직접적으로 접촉하며 이송을 유발하는 부품이며 그것의 회전속도는 충돌 후 물체의 속도에 영향을 주기 때문에 전체적인 입자들의 흐름과 연관되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 롤러의

회전속도를 변화시켰을 때 마늘 수확기의 성능의 개선을 기대할 수 있을 것이다. 롤러의 회전속도는 동력전달과정에서의 기어비로 정해지는 것으로 그 과정을 일부 수정하면 실제 마늘 수확기의 롤러 회전속도도 변경이 가능하다. 시뮬레이션에서 작동 조건의 변경은 간단히 할 수 있으므로 롤러 회전속도를 증가시킨 조건으로 해석하여 성능을 도출해내고 이전의 회전속도에서 얻은 성능과 비교하여 분석하도록 하였다. 롤러의 회전속도는 기본이 250 rpm이었으며 20%를 상승시킨 300 rpm으로 설정하여 시뮬레이션을 수행하고 마늘 수확기 성능을 얻도록 했다.

또한, 앞에서 재료의 반발계수를 검증한 시뮬레이션의 결과로 입력한 반발계수에 비해 시뮬레이션으로 해석되는 반발계수가 낮게 나타나 개선할 필요성이 있는 것으로 파악되었다. 측정된 반발계수보다 시뮬레이션에 적용되어야 할 실제 반발계수는 더 클 수 있기 때문에 증가된 반발계수를 시뮬레이션에 적용하여 수확 성능의 변화를 비교하고자 하였다. 또한 롤러의 재료에 따른 설계요인인 반발계수의 상승은 충돌한 입자의 속도를 빠르게 하므로 롤러 회전속도의 증가와 비슷한 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 측정되었던 마늘과 고무의 반발계수는 0.477이었으며 시뮬레이션 비교 검증에서 약 0.06정도 낮게 해석되었기 때문에 0.537로 12.6% 가량 증가시킨 반발계수 수치를 입력하여 시뮬레이션으로 마늘 수확기 성능을 도출하고 비교하였다.



## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 물성 측정 결과 및 모델 구성

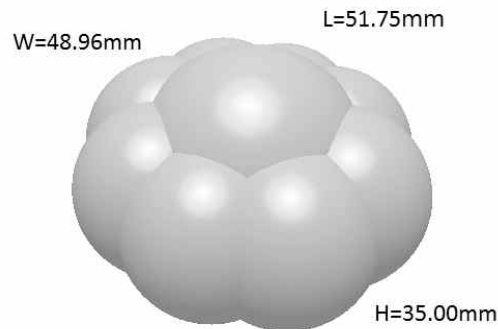
#### 4.1.1. 마늘 및 토양의 물성 및 입자 모델

마늘 샘플 30개에 대해 측정한 기하학적 특성은 Table 3에 평균과 표준편차로 나타내었다. 다른 품종에 비해 대서마늘의 크기 및 중량이 크기 때문에 이전 연구에서 측정된 다른 품종의 마늘보다는 크게 나타났다. 농사로에서 제공하는 대서마늘의 무게보다는 적게 측정되었으며 마늘밭의 관리가 제대로 이루어지지 못해 크기가 작은 낮은 품질의 마늘이 주로 수확된 것으로 보였다. 측정된 특성은 대략적인 마늘의 크기 및 무게에 해당하는 것으로 판단할 수 있었다. 측정한 치수들을 바탕으로 Fig. 23과 같이 시뮬레이션 상에서의 마늘 구근 모형이 구현하도록 하였다. 구근 부분의 경우 9개의 구형 입자를 모아서 마늘 형태에 가까운 입자 형태를 구성하였다. 길이, 폭, 높이를 실제 측정한 값과 같아지도록 9개의 구형 입자의 크기와 위치를 계산하였다. 이와 같이 제작된 구근을 조건에 따라 정해진 위치에 생성할 수 있도록 하였으며 이를 활용하여 마늘 수확 시뮬레이션을 수행하였다. 다른 품종 및 등급의 마늘에 대한 수확 작업을 시뮬레이션하기 위해서는 구현한 마늘 입자 모델의 크기를 조절하여 진행할 수 있으며 마늘 모델의 크기에 편차를 적용하면 다양한 크기의 마늘을 수확하는 과정을 분석할 수 있고 마늘의 크기에 따른 수확 성능을 분석하는 것도 가능할 것이다.

**Table 3** Size and weight of garlic samples

Term	Mean (std dev.)	Reference
Stalk length	90.17 cm (11.88)	96 cm <sup>a)</sup>
Stalk diameter	6.76 mm (0.91)	9.9 mm <sup>b)</sup>
Bulb length	51.75 mm (5.67)	49.4 mm <sup>b)</sup> , 46.51 mm <sup>c)</sup>
Bulb width	48.96 mm (5.52)	44.7 mm <sup>b)</sup>
Bulb height	35.00 mm (3.29)	32.6 mm <sup>b)</sup>
Stalk weight	18.83 g (5.45)	-
Bulb weight	42.69 g (11.09)	56.6 g <sup>a)</sup> , 35.2 g <sup>b)</sup> , 32.81 g <sup>c)</sup>

a) Nongsaro (2017), b) Hong et al. (2000), c) Haciseferoğulları et al. (2004)

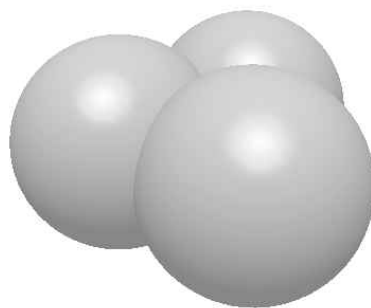
**Fig. 23** Garlic bulb particle in EDEM

수거한 토양의 크기와 무게를 측정한 결과를 Table 4에 나타냈다. EDEM에서는 토양에 대해 soil starter pack을 제공하고 있으며 Fig. 24와 같은 형태를 기본 토양 입자로 하여 토양의 조건에 따라 반발력 및 점착력을 조절할 수 있도록 하였다. 이 입자를 등가지름에 맞춰 평균 크기를 조절하고 표준편차를 적용하여 크기를 다양하게 하였으며 토양의

물성을 적용하여 마늘 수확 시뮬레이션의 이물질 역할을 할 토양 입자로 활용하였다. 실제 토양은 더 작은 입자들로 이루어져 있지만 시뮬레이션에서 작은 입자들까지 모두 적용하여 해석하면 해석시간이 크게 증가하는 단점이 있고 수확 과정에 크게 영향은 주지 못할 것으로 예상되어 큰 입자들만 해석하도록 했다. 실제 토양의 특성과 유사하도록 측정된 편차를 모델에 적용하여 다양한 크기의 입자들로 토양이 구성되도록 설정하였다.

**Table 4** Size and weight of soil

Term	Mean (std dev.)
Projection area	800.37 mm <sup>2</sup> (275)
Equivalent diameter	31.52 mm (5.16)
weight	8.32 g (4.51)

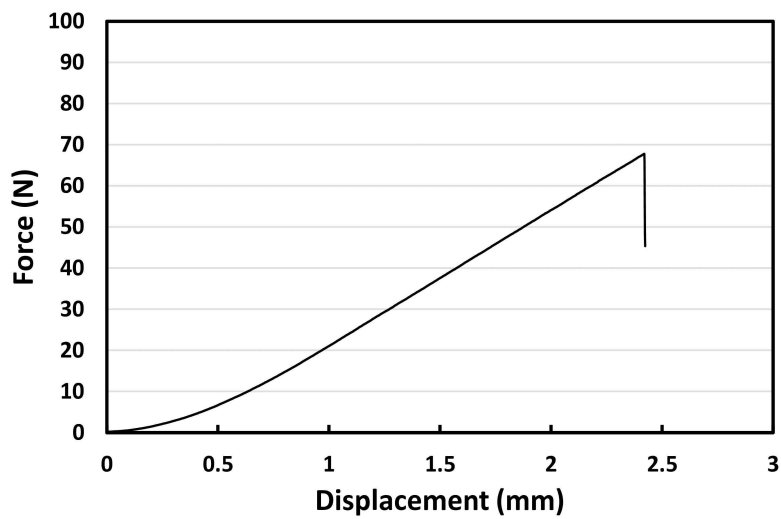


**Fig. 24** Particle of soil starter pack in EDEM

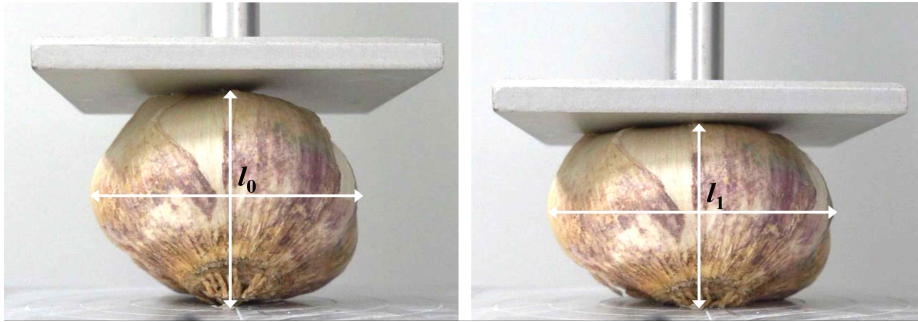
마늘 구근과 토양에 대해 탄성계수, 푸아송비 측정 실험을 통해 구한 물성 값은 Table 5에 정리하였다. 탄성계수를 측정하기 위한 압축시험 결과는 Fig. 25와 같이 나타났으며 30개의 마늘 샘플들의 각각의 결과로 탄성계수를 구하고 정리하였다. 푸아송비를 측정하기 위해 Fig. 26와 같이 영상의 이미지를 활용해 압축 전후의 가로, 세로 길이를 측정하고 계산하였다. 이렇게 얻어진 물성 값은 기계 수확과정을 분석하기 위한 시뮬레이션에서의 마늘, 토양 입자들의 물성 수치들을 입력하기 위한 참고자료로 활용되었다. 마늘의 탄성계수는 품종 및 재배환경, 크기, 함수율 등에 따라 차이가 발생한다. 다양한 탄성계수를 모두 적용하여 해석하기보다는 측정된 수치를 대푯값으로 하여 해석하도록 하였으며 탄성계수를 요인으로 하여 영향을 분석하는 해석도 이루어질 수 있을 것이다. 토양의 경우 토성에 따라 물성이 다양하게 나타날 수 있고 점착력도 존재하기 때문에 이산요소법을 이용한 토양 해석 모델에 대한 고찰은 추가적으로 필요할 것으로 보인다. 반발계수와 마찰계수는 물체 자체의 특성이 아니라 물체간 상호작용에서 나타나는 성질이다. 기계수확에서 해석될 재료들에 따라 마늘과의 반발계수, 마찰계수는 다르게 나타나게 되며 자세한 내용은 각각의 재료의 물성에 나타내도록 하였다.

**Table 5** Physical properties of garlic and soil

	Term	Mean (std dev.)
Garlic	Young's modulus	$1.338 \times 10^7$ Pa (0.387)
	Reference (Noh et al., 1999)	$9.709 \times 10^6$ Pa
	Poisson's ratio	0.457 (0.194)
Soil	Young's modulus	$1.141 \times 10^8$ Pa (0.701)
	Poisson's ratio	0.281 (0.232)



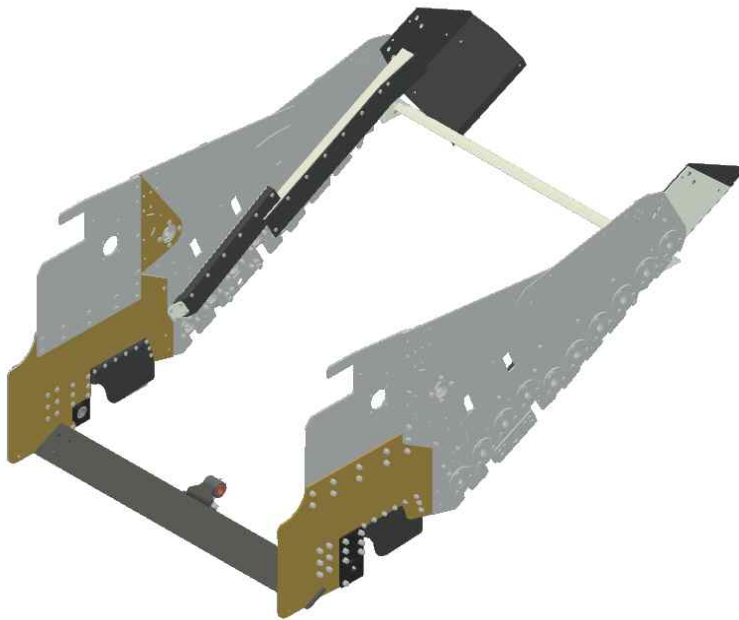
**Fig. 25** Force-displacement curve of Daeseo garlic using Texture Analyzer



**Fig. 26** Garlic length before and after compression for Poisson's ratio measurement

#### 4.1.2. 마늘 수확기 해석 모델

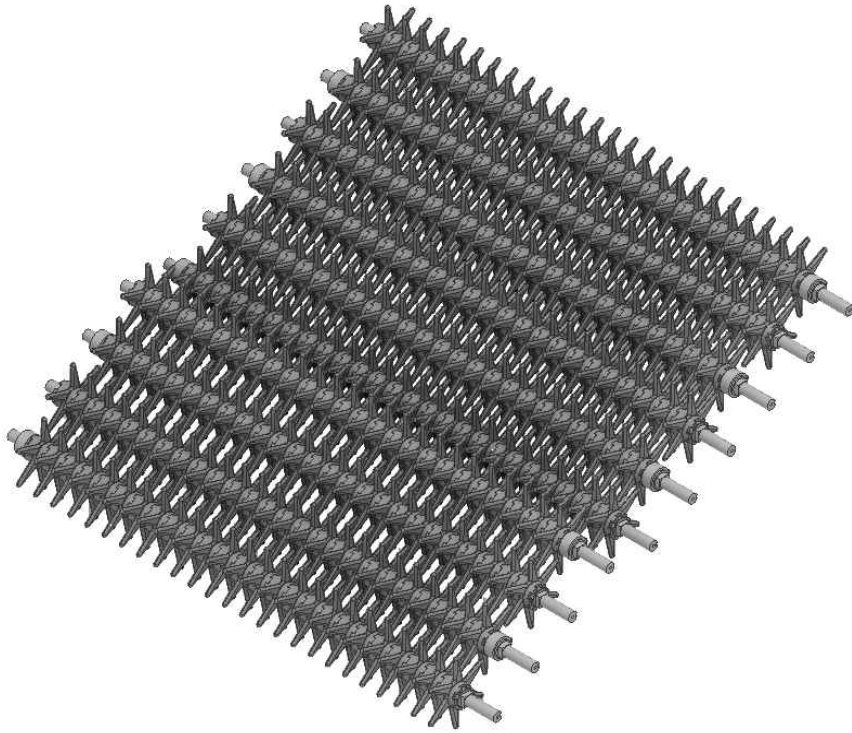
효율적인 해석을 위해서 마늘과 접촉하는 마늘 수확기의 부품들을 시제품 설계안을 참고하여 크게 세 부분으로 나누어 CAD 파일로 제작하였으며 Figs. 27, 28, 29와 같이 본체 구조, 진동봉, 롤러 축으로 구성하였다. 이러한 3차원 모델들을 EDEM 프로그램에 대입하고 움직임 설정하여 실제 마늘 수확기가 기계 수확작업을 수행하는 과정을 묘사할 수 있도록 하였다. 마늘 수확기 부품들의 재료인 강철과 고무의 물성에 대해서는 일반적으로 잘 알려져 있어 문헌을 참고하여 Table 6에 정리하였으며 해당 수치들을 시뮬레이션에 적용하여 해석하도록 하였다.



**Fig. 27** View of body structure geometry model



**Fig. 28** View of vibration rod geometry model



**Fig. 29** View of roller axes geometry model

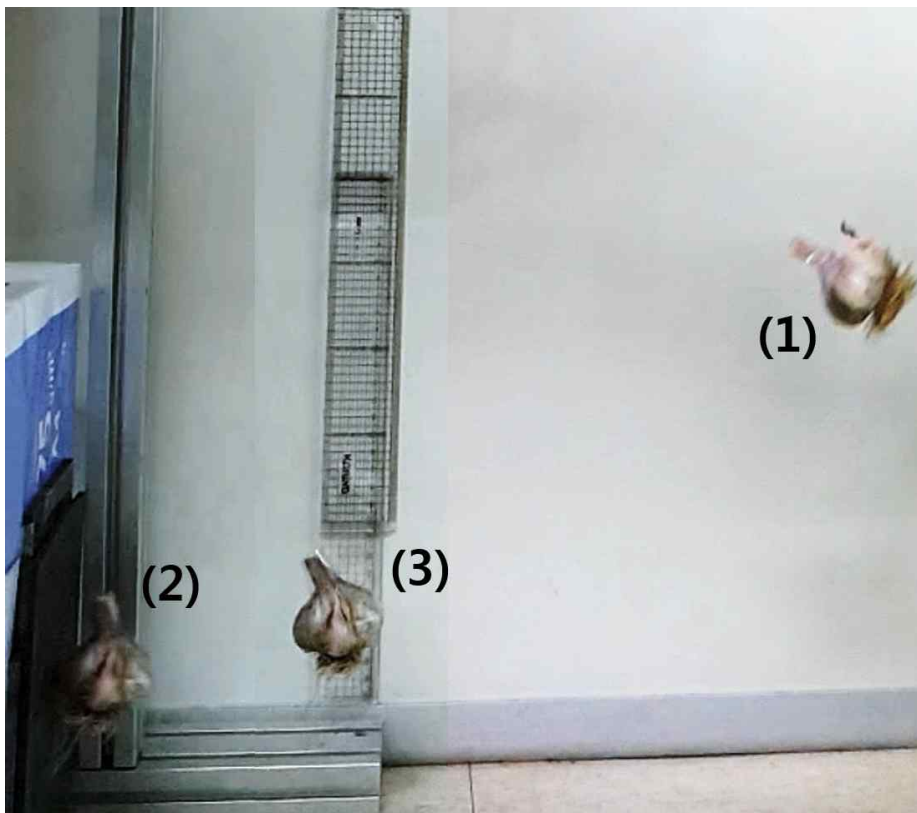
**Table 6** Mechanical properties of the materials (Kruggel-Emden et al., 2008)

Material	Young's Modulus (Pa)	Poisson's ratio (-)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Steel	$2.1 \times 10^{11}$	0.3	7766
Rubber	$3 \times 10^6$	0.48	1934

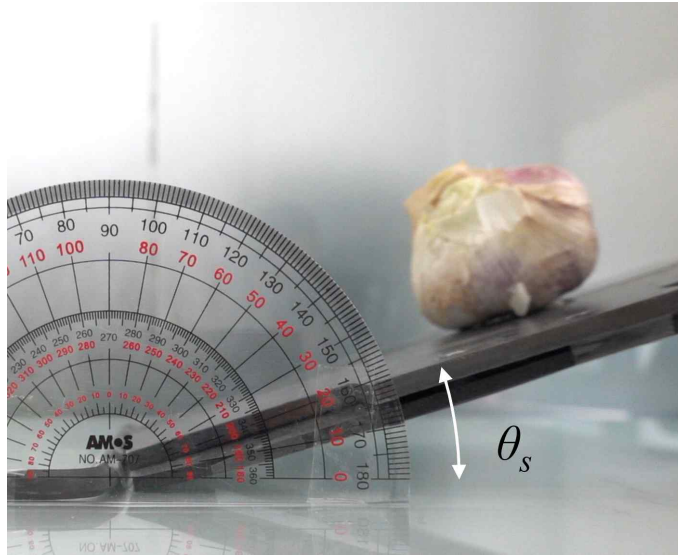
마늘 및 토양과 재료의 상호작용에서의 물성을 측정하기 위해 실험을 수행하였다. Fig. 30과 같이 실시된 마찰시험에서는 초기 낙하(1)시의



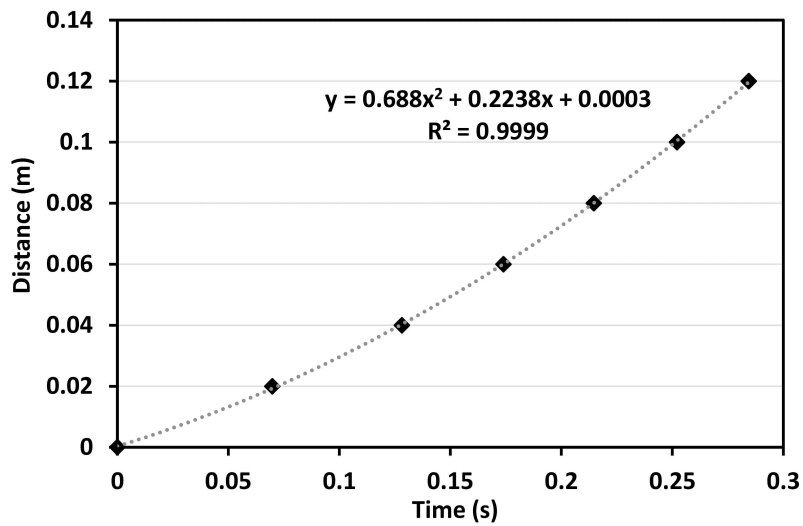
높이와 반발(2)한 이후 올라간(3) 높이를 측정하여 반발계수를 계산할 수 있었다. Fig. 31에서는 마찰시험 과정에서 측정되는 정지마찰각( $\theta_s$ )을 확인할 수 있었으며 이를 이용해 정지마찰계수를 구하였다. Fig. 32에는 정지마찰각 이상의 각도에서 마늘이 미끄러질 때의 가속도를 구하기 위하여 시간에 따른 거리 그래프를 나타내었으며 추세선을 통해서 가속도를 구할 수 있었고 운동마찰계수를 계산하였다. 측정된 계수들의 평균값과 표준편차는 Table 7에 나타나 있으며 시뮬레이션 해석을 위해 설정 값의 기초 자료로 활용하였다.



**Fig. 30** View of restitution test of garlic



**Fig. 31** View of fiction test for coefficient of static friction



**Fig. 32** Distance graph of friction test for sliding acceleration

**Table 7** Collision and friction properties between samples and materials

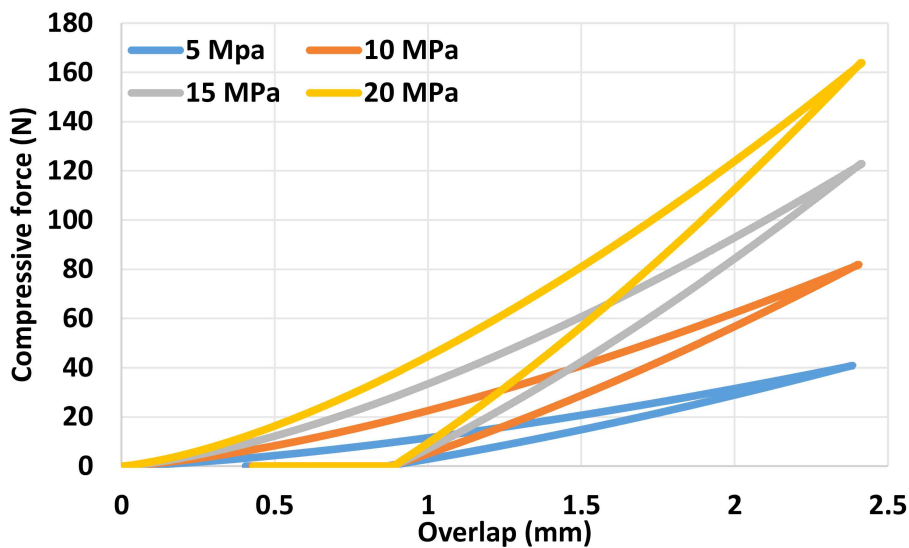
Sample	Term	material	Mean (std dev.)
Garlic	Coefficient of restitution	steel	0.434 (0.0197)
		rubber	0.477 (0.0700)
	Coefficient of static friction	steel	0.361 (0.0798)
		rubber	0.582 (0.0193)
	Coefficient of kinetic friction	steel	0.300 (0.0104)
		rubber	0.250 (0.0661)
Soil	Coefficient of static friction	steel	0.387 (0.0647)
		rubber	0.677 (0.1000)
	Coefficient of kinetic friction	steel	0.254 (0.0477)
		rubber	0.454 (0.1238)
Garlic reference (Hacıseferoğlu et al., 2005)	Coefficient of static friction	iron sheet	0.472 (0.023)
	Coefficient of kinetic friction	iron sheet	0.406 (0.019)

## 4.2. 적용성 평가를 위한 시뮬레이션 비교 분석

### 4.2.1. 압축시험 결과 비교 분석

30개의 마늘 시료를 대상으로 Texture Analyzer를 이용하여 압축 시험을 하여 구한 마늘 시료의 평균 탄성계수는 13.38 MPa로 나타났으며, 표준편차는 3.87 MPa로 크게 나타나 생물체의 물성이 넓은 범위로 나타나는 것을 확인하였다. EDEM 프로그램에 적용되는 탄성계수에 따라 시뮬레이션으로 해석한 압축시험에서의 압축력이 어떻게 나타나는지 파악하고 비교하여 시뮬레이션의 적용성을 평가하기 위해 수치를 조절하며 시뮬레이션을 수행하였으며 해석 결과는 Fig. 33에 정리하여 나타내었다. 측정된 탄성계수의 평균값의 근방인 5-20

MPa의 범위로 수치를 입력하였으며 EEPA 접촉모델을 적용하여 아래와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 각각의 그래프에서 최댓값은 5 MPa에서 40.8 N, 10 MPa에서 81.8 N, 15 MPa에서 122.8 N, 20 MPa에서 163.9 N으로 나타났다. 시뮬레이션으로 해석한 압축시험 결과에서 압축력 결과가 확연히 탄성계수에 비례하여 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 34에는 마늘 시료 압축 시험 결과 일부를 나타내었으며 같은 차원과 축척으로 나타내어 시뮬레이션 결과와 비교할 수 있도록 하였다. 탄성계수가 10 MPa인 그래프와 비교하여 크게 벗어나지 않았기 때문에 측정된 탄성계수를 시뮬레이션에 적용하기에 문제가 없을 것으로 판단하였고 수확 분석 시뮬레이션에 마늘 입자의 물성을 측정된 수치로 설정하도록 할 것이다.



**Fig. 33** Force-overlap graph for Young's modulus of garlic particle in EDEM

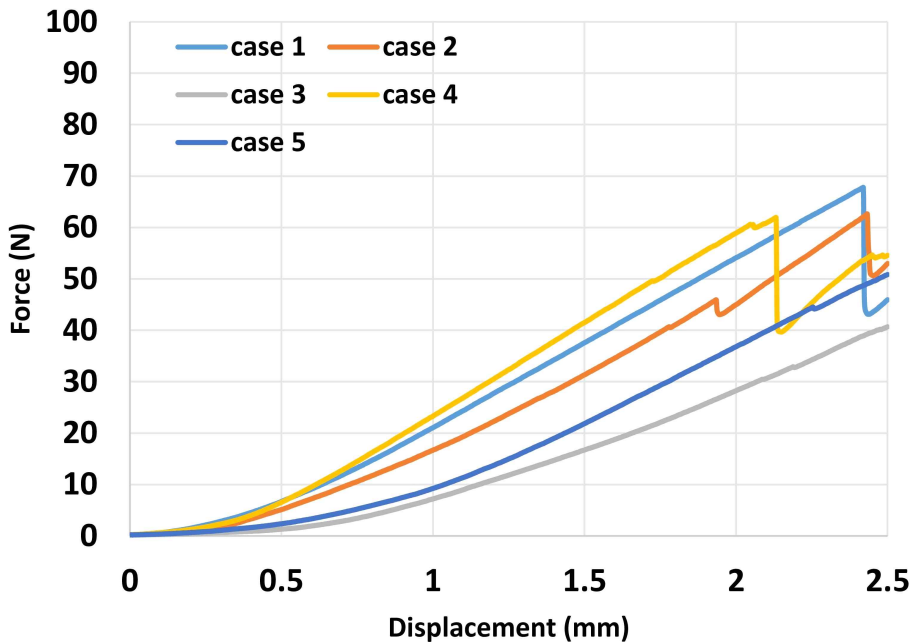
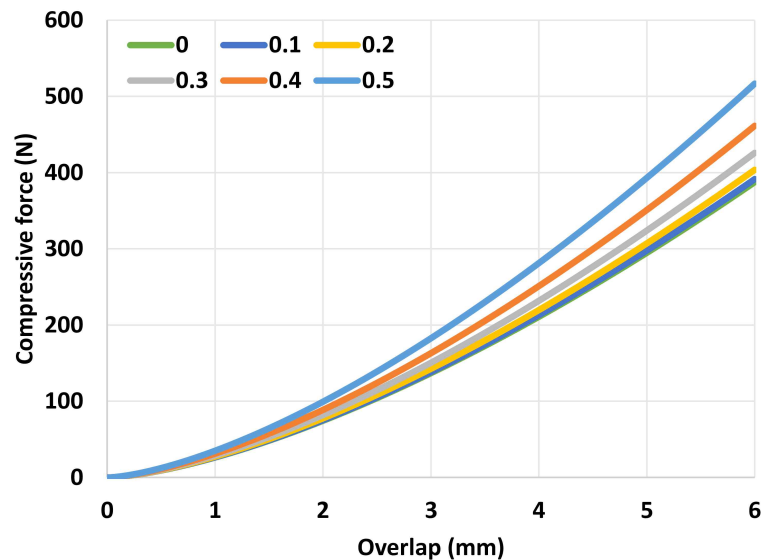


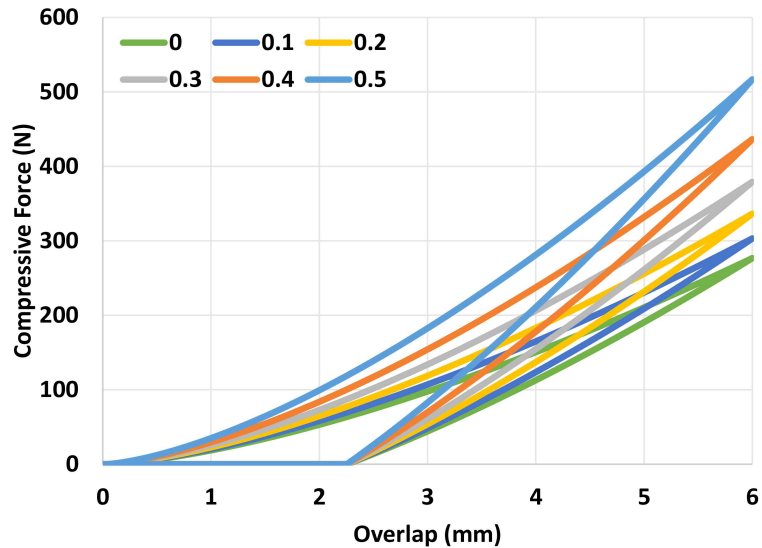
Fig. 34 Force-displacement graph of garlic using Texture Analyzer

마늘 구근의 푸아송비는 압축시험에서 0.457로 나타났다. 그러나 표준편차가 0.194로 크게 나타나 측정된 푸아송비를 확신하기 어려운 것으로 보였다. 마늘 구근 자체가 비등방성이며 내부 공간이 인편 및 줄기로 구성되며 빈 공간도 있기 때문에 푸아송비 자체가 활용되기 부적절할 수 있다. 시뮬레이션에서는 푸아송비가 접촉력에 영향을 주는 요인이기 때문에 중첩거리에 따른 반발력의 결과를 비교하여 영향을 파악할 수 있었다. Hertz-Mindlin 접촉 모델과 EEPA 접촉 모델을 각각 적용하여 해석한 결과를 Figs. 35, 36에 나타내었으며 푸아송비에 따른 차이와 모델에 따른 차이를 확인할 수 있다. Hertz-Mindlin 모델에서는 푸아송비가 0.5일 때 최대 압축력이 516.8 N으로 나타났으며 이를 기준으로 푸아송비가 0.4일 때 89.28%, 0.3일 때 82.41%, 0.2일 때 78.12%, 0.1일 때 75.75%, 0일 때 75.00% 수준으로 최대 압축력이

감소한 것으로 나타났다. EEPA 모델을 적용한 경우 푸아송비가 0.5일 때 516.8N이 최대로 나타났으며 푸아송비가 0.4일 때 84.45%, 0.3일 때 73.38%, 0.2일 때 65.09%, 0.1일 때 58.67%, 0일 때 53.55%의 수준으로 나타났다. EEPA 모델의 접촉력 해석에서 푸아송비의 영향이 Hertz-Mindlin 모델보다 더 큰 것으로 나타났으며 푸아송비가 감소함에 따라 접촉력이 작게 계산되는 경향성을 파악할 수 있었다. 마늘 입자에 EEPA 모델을 적용할 것이므로 푸아송비를 더 고려해야 한다. 다만 접촉 응력 해석의 적절성은 탄성계수 검증으로 이루어졌으므로 측정된 푸아송비를 그대로 적용하여 달라지는 것이 없도록 하였다.



**Fig. 35** Force-overlap graph for Poisson's ratio of garlic particle with Hertz-Mindlin contact model in EDEM



**Fig. 36** Force-overlap graph for Poisson's ratio of garlic particle with EEPA contact model in EDEM

#### 4.2.2. 반발시험 결과 비교 분석

마늘 입자 30개의 반발계수를 각각 측정하는 시뮬레이션을 수행한 결과를 Table 8에 나타내었다. 접촉 모델별로 0.3-0.5의 반발계수를 적용하여 시뮬레이션을 수행했으며 시뮬레이션 결과에서 다시 반발계수를 측정해내었다. 결과를 보면 실제 입력한 반발계수 수치에 비해 충돌 시험 시뮬레이션으로 얻어진 반발계수가 낮게 나타난 것을 확인할 수 있다. 프레임에 매달아 재료판과 충돌시키는 방식으로 마늘의 탄성계수를 측정해내는 실험을 시뮬레이션에서 완전히 일치하게 구현해내지는 못하였다. 그러나 일관되게 낮게 측정되었기 때문에 탄성계수가 아닌 다른 요인에 의해 실험에 대한 거동 해석의 차이가 발생하는 것으로 보인다. 마늘 입자가 구형이 아닌 마늘의 형태를 하고 있기 때문에 엇나가게 충돌하는 경우 반발계수가 낮아질 수 있다. 특히 소성 변형을 나타내는 EEPA 모델에서는 더 큰 폭으로 낮게 측정되었다.

이는 생물체의 반발계수 측정에 충돌 시험을 적용하는 것이 적절하지 않을 수도 있다는 것을 보여준다. 그렇지만 생물체의 탄성 변형 한계 내에서는 측정에 큰 오류는 없을 것이며 이를 EDEM에서 EEPA 모델로 검증하는 것이 적절하지 않은 것으로 판단된다. 시뮬레이션에서 반발계수가 더 작게 나타나는 경향이 있는 것이 파악되었으며 EDEM에 반발계수를 적용할 때에는 측정된 값보다 더 크게 입력하는 것이 적절할 수 있고 단순하지 않은 형상에 대해서는 충돌 실험으로 측정된 반발계수가 물체 자체의 반발계수와는 다를 수 있을 것으로 해석된다.

**Table 8** Coefficient of restitution result of collision test in EDEM

Contact model	Coefficient of restitution setting value	Mean (std dev.)
Hertz-Mindlin	0.3	0.264 (0.0500)
	0.35	0.292 (0.0498)
	0.4	0.342 (0.0458)
	0.45	0.384 (0.0496)
	0.5	0.434 (0.0399)
EEPA	0.3	0.188 (0.0478)
	0.35	0.216 (0.0533)
	0.4	0.235 (0.0336)
	0.45	0.268 (0.0479)
	0.5	0.301 (0.0541)

#### 4.2.3. 마찰시험 결과 비교 분석

정지 마찰계수는 시뮬레이션으로 마찰 실험이 구현이 가능하고 계측할 수 있었던 Hertz-Mindlin 모델에 대해서만 Table 9와 같이 결과를 얻었다.



정지 마찰계수 설정값과 시뮬레이션 해석값이 거의 동일하게 나타났다. 약간의 차이는 미끄러짐의 시작을 판단하는 기준에 의해 약간의 오차가 있었을 것으로 예상된다. 실제 실험에서나 시뮬레이션에서도 마늘이 언제 미끄러지기 시작했는지 결정하는 것에서 오차가 발생할 수 있다. 대부분 표준편차도 매우 작게 나타나 다소 복잡한 마늘의 형태이지만 정지된 상태에서 시작하여 미끄러짐은 일정하게 나타난 것으로 보인다. 다만 무게중심이 불안정하게 배치되어 기울어짐에 따라 굴러버리는 현상에 의해 정지 마찰계수가 작게 나타나기도 했다. EEPA 모델을 적용한 경우에는 약간의 경사에서도 바로 미끄러져버려 마찰계수 검증에 위해서는 Hertz-Mindlin 모델의 활용이 요구될 것으로 판단되며 EEPA 모델은 정적인 마찰 해석에 대해 실제와는 다르게 해석해 낼 가능성이 있는 것으로 보인다.

**Table 9** Coefficient of static friction result of friction test in EDEM

Contact model	Coefficient of static friction setting value	Mean (std dev.)
Hertz-Mindlin	0.3	0.302 (0.0001)
	0.4	0.402 (0.0001)
	0.5	0.501 (0.0018)
	0.6	0.594 (0.0379)
	0.7	0.701 (0.0003)

운동 마찰계수의 경우 시뮬레이션에서는 구름 마찰계수라고 나타나있으며 입자에 가해지는 토크에 연관되어 있다. 35도의 경사판에서 미끄러지는 현상을 시뮬레이션에서도 구현하여 운동 마찰계수 측정 방법으로 구현한 결과를 Table 10에 접촉 모델 및 설정값에 따라 정리하였다. 결과를 살펴보면 운동 마찰계수가 시뮬레이션 상에서는 0.561-0.582의 거의

일정한 수치로 나타났다. 경사지에서의 미끄럼 가속도에 운동 마찰계수가 큰 영향을 주지 않고 있는 것으로 보였다. 운동 마찰계수를 0.2에서 두 배인 0.4로 증가시켜도 시뮬레이션으로 얻어진 운동마찰계수는 0.02의 증가만이 확인되었다. 또한 접촉 모델에 따른 뚜렷한 차이도 나타나지 않았다. 실제 실험에서 측정된 마늘과 고무의 운동 마찰계수는 0.250으로 시뮬레이션에서 구름 마찰계수를 조절하는 것으로는 동일한 실험 결과를 구현하기 어려운 것으로 보였다. 동적 마찰에 대해 이산요소법으로 해석해내기 위한 적절한 모델을 발견하지 못하였으며 EDEM 프로그램의 구름 마찰계수에 적용할 물성을 측정하기 위한 새로운 방법을 찾아내기 위한 연구가 필요할 것으로 보인다.

**Table 10** Coefficient of kinetic friction result of friction test in EDEM

Contact model	Coefficient of rolling friction setting value	Mean (std dev.)
Hertz-Mindlin	0.2	0.562 (0.0041)
	0.25	0.563 (0.0394)
	0.3	0.578 (0.0329)
	0.35	0.581 (0.0068)
	0.4	0.582 (0.0004)
EEPA	0.2	0.561 (0.0486)
	0.25	0.575 (0.0259)
	0.3	0.579 (0.0160)
	0.35	0.582 (0.0005)
	0.4	0.582 (0.0003)

#### 4.2.4 롤러 충돌 시험 비교 분석

마늘 모형과 고무롤러를 충돌시키면서 모형의 가속도를 측정한 결과는 Fig. 37과 같다. 그리고 조건이 동일하도록 설계한 시뮬레이션의 가속도

해석 결과는 Fig. 38에 나타내었다. 한 축당 측정 가능한 가속도의 최댓값이 정해져 있어 충돌과정에서 나타나는 큰 가속도 수치를 충분히 측정해내지 못한 경우가 있는 것으로 보였다. 그리고 모형과 가속도계가 선으로 연결되어 있다 보니 실제로는 시뮬레이션에서 구현된 것처럼 거동이 자유롭지는 못하였다. 그래서 측정된 가속도를 비슷한 것으로 판단하기에는 어려움이 있었다. 또한 가속도계로 측정된 결과에서는 충돌후의 진동까지 나타났다. 시뮬레이션에서는 입자 자체의 진동은 발생하지 않기 때문에 차이가 있었다. 그래도 수치적으로 분석하기 위해 가속도의 RMS를 계산한 결과를 Table 11에 정리하였다. 시뮬레이션으로 해석한 경우가 크게 나타났으며 실제 실험에 비해 충돌이 더 원활하게 이루어졌고 세 축 방향 모두의 가속도가 한계를 넘은 충돌이 많이 해석되었기 때문인 것으로 파악된다. 시뮬레이션에서는 회전속도가 빨라질수록 RMS 값이 증가하여 충돌 횟수와 충격력이 증가하는 것으로 생각되었지만 실제 측정에서는 150 rpm에서 RMS 값이 100 rpm보다 낮게 나타나 회전속도가 빨라지며 빗나가는 충돌이 주로 발생하게 되었던 것으로 보였다. EDEM 시뮬레이션으로 해석한 충돌 과정의 RMS 값은 측정 한계를 반영하지 않았을 때에 회전속도에 비례하여 증가하는 것으로 보였으며 계측값과 비교하여 2.8-7.8배까지 나타나 실제로는 측정된 수치에 비해 더 큰 충격이 가해지고 있음을 예측할 수 있었다.

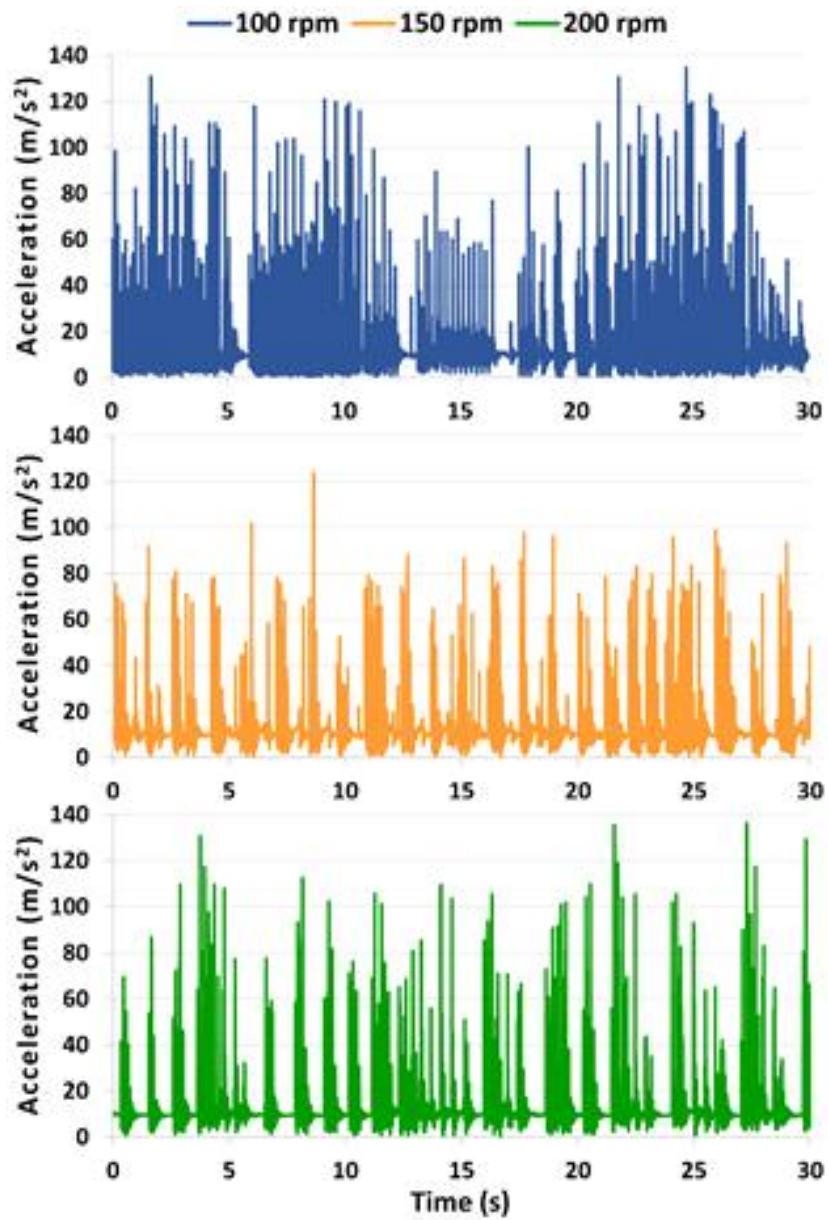
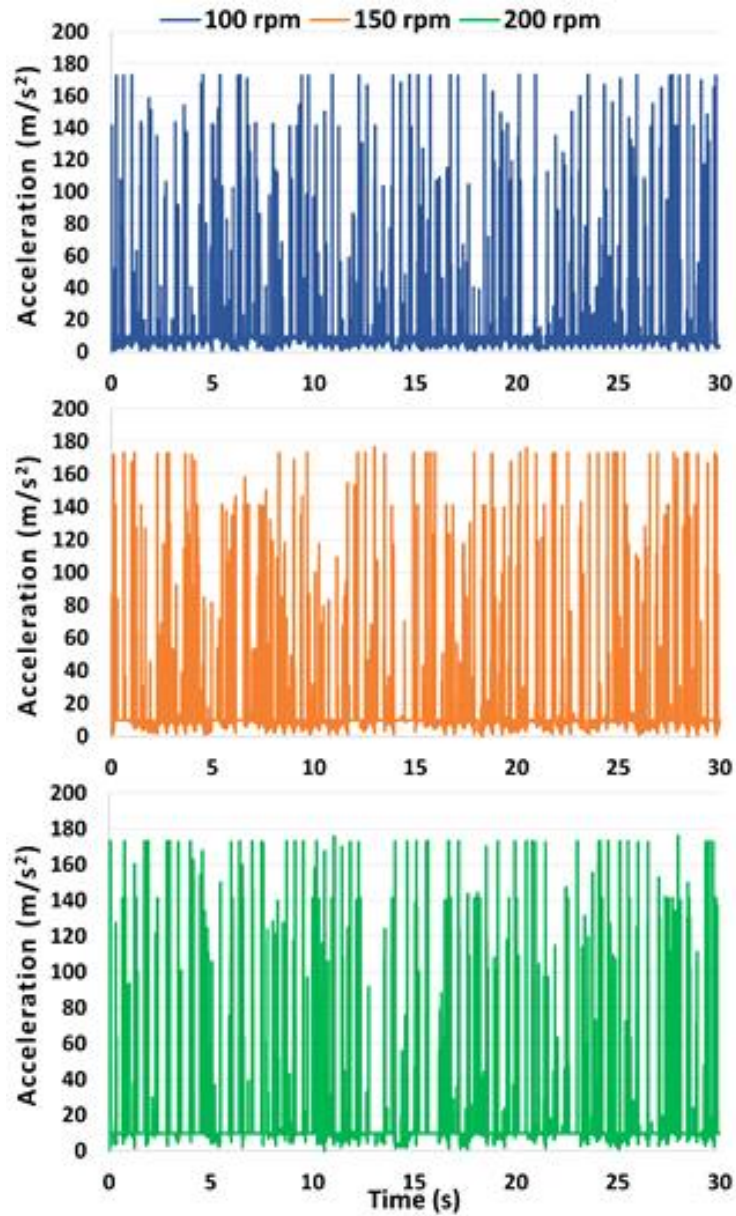


Fig. 37 Measured acceleration of the garlic model during collision experiments



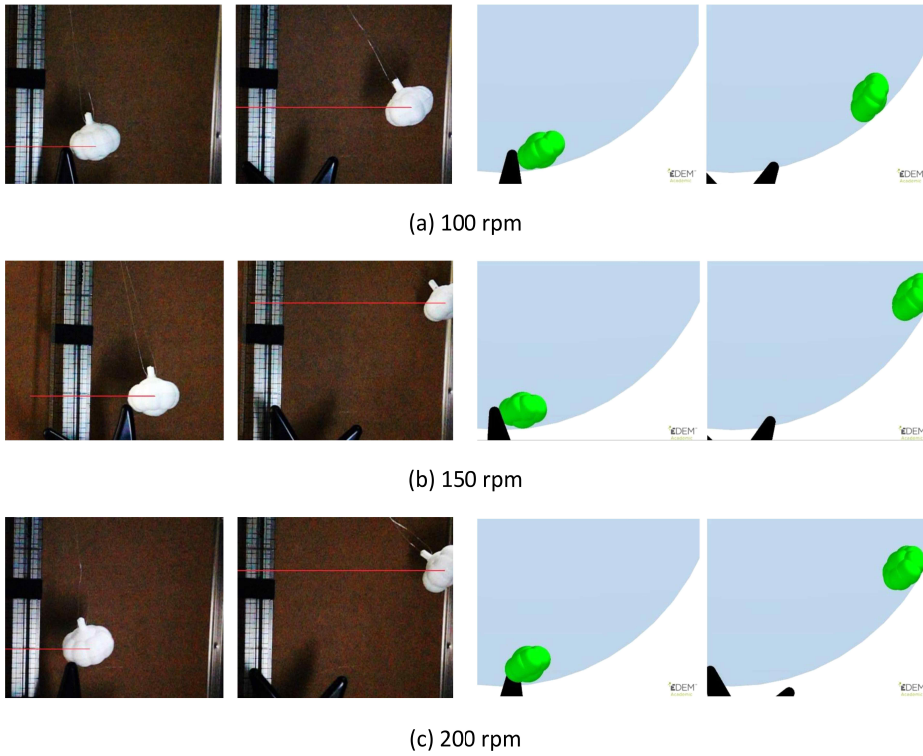
**Fig. 38** Acceleration determined in EDEM simulations about collision experiments reflecting the accelerometer measurement limit

**Table 11** Impact acceleration of a garlic bulb based on the roller rotational speed determined experimentally and by simulation

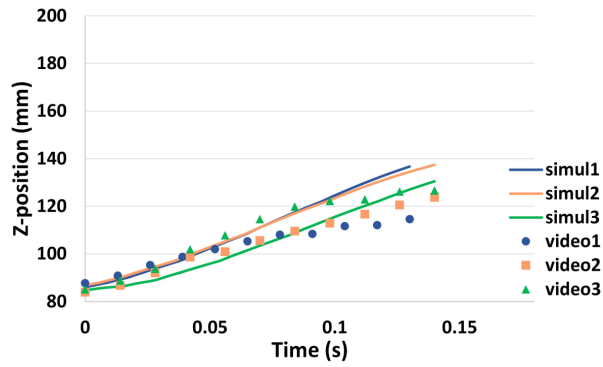
Roller rotational speed (rpm)	RMS acceleration (m/s <sup>2</sup> )		
	Accelerometer	EDEM data reflecting the accelerometer limit	EDEM raw data
100	20.35	24.01	58.14
150	16.77	26.16	85.72
200	18.54	27.59	144.88

마늘 모형과 롤러의 충돌 순간을 디지털카메라의 고속 촬영 기능으로 확인할 수 있었으며 Fig. 39와 같이 충돌 순간과 충돌 후 상승한 모습을 나타내었다. 그리고 시뮬레이션 해석 결과에서도 유사한 순간의 이미지를 얻어 비교할 수 있도록 하였다. 모형에 가속도계가 없어 거동이 자유롭게 나타날 수 있었던 것으로 보이며 거동 후 실에 의한 원호를 따르는 움직임이 확인되었다. 시뮬레이션에서도 충돌 후 외곽의 원통 구조를 따라 상승하는 것으로 나타났다. 그림에는 충돌 순간과 동일한 시간이 흐른 후의 촬영 영상과 시뮬레이션 이미지를 대조하였다. 충돌 후 거동이 EDEM에서 여러 회전속도에 걸쳐 비슷하게 해석될 수 있는 것으로 파악되었다. 또한 Fig. 40에는 시간에 따른 상승 높이를 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 같이 나타내어 비교하였다. 같은 시간동안 비슷한 높이를 올라간 것으로 볼 수 있었으며 시간당 이동 거리는 속도의 개념으로서 회전속도가 증가함에 따라 입자의 속도도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 빠른 회전속도로 돌고 있는 롤러가 더 큰 충격량을 전달하기 때문에 충돌 후 입자의 속도가 빠르게 나타나는 것으로 이해될 수 있다. 다만 충돌이 항상 일정한 조건에서 발생할 수

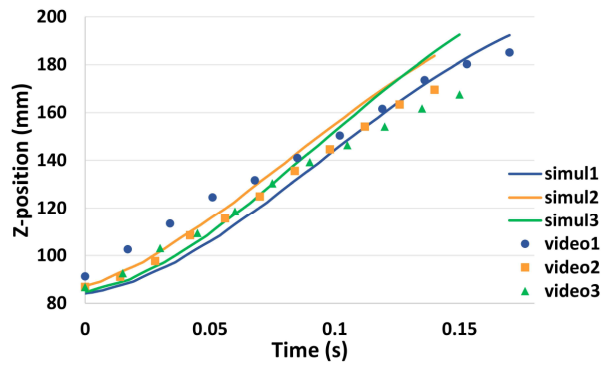
없으며 비슷하게 부딪히거나 끝부분에만 살짝 닿는 경우 등 다양한 상황의 충돌이 발생하기 때문에 긴 시간에 걸친 다수의 충돌 전체를 살펴보면 동일한 충돌 현상으로 판단하기에는 거동 분석만으로는 어려움이 존재한다.



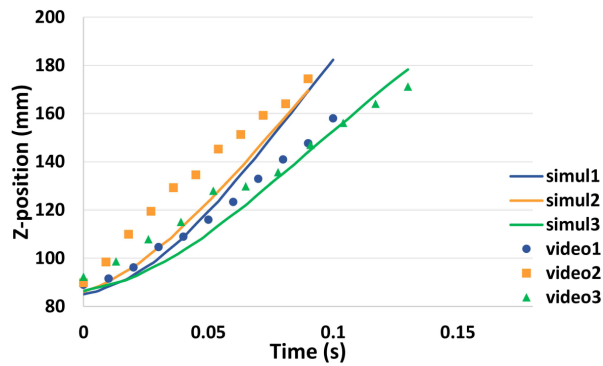
**Fig. 39** Comparison of experiments and simulations at the collision moment and after collision



(a) 100 rpm



(b) 150 rpm



(c) 200 rpm

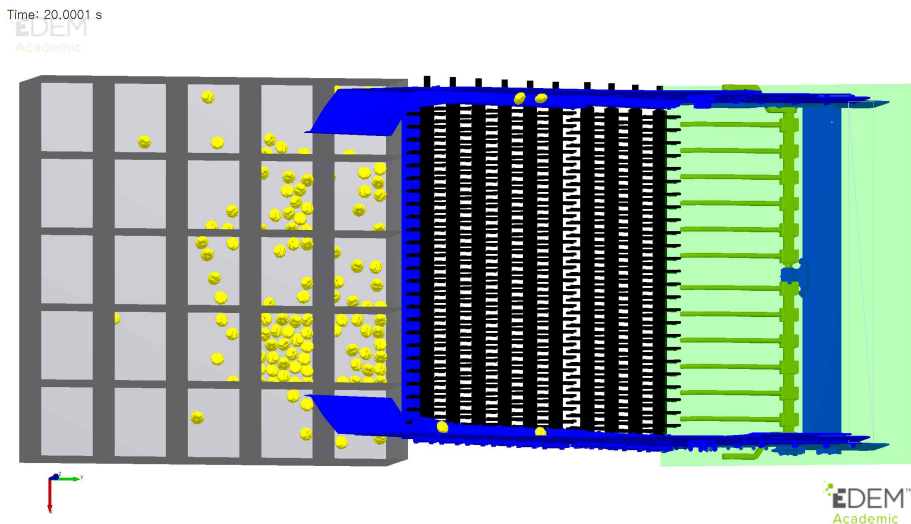
**Fig. 40** Behavior of the garlic model after collision in simulation analysis (lines), and experimental phenomena (dots)



### 4.3. 수확 과정 시뮬레이션을 통한 수확 성능 분석

#### 4.3.1. 토양 유무에 따른 마늘 수확 성능 결과

토양 입자를 포함하지 않고 마늘 입자만 공급하는 테스트 조건으로 140개의 마늘 입자를 수확하는 시뮬레이션을 20초에 대해 시행하여 마늘 입자의 이송이 완료되었다. 수확된 마늘은 Fig. 41과 같이 마늘 수확기 뒤편에 설치한 임의의 적재함에 수거되었다. 시뮬레이션 결과를 분석하여 수확률, 이송 시간, 수확기 내부에서의 마늘에 가해지는 충격력, 그리고 마늘 수확기에서 발생한 최대 충격력을 Table 12에 정리하였다.

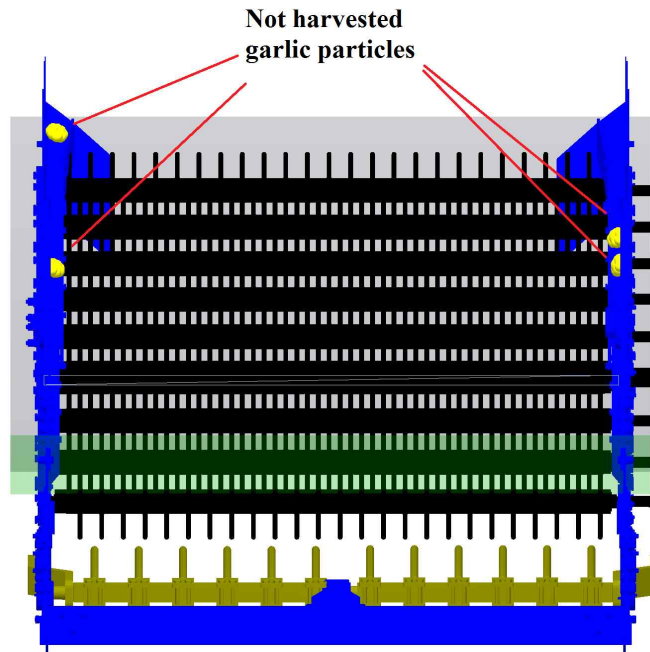


**Fig. 41** View of harvested garlic in a loading box with only garlic under test condition

**Table 12** Result of mechanical harvesting simulation with only garlic under test condition

Term	Mean (std dev.)
Harvesting rate (%)	95.00 (133/140)
Transfer time (s)	1.686 (0.4895)
Impact force of garlic (N)	18.25 (29.14)
Maximum impact force (N)	952.09

수확률은 95%로 나타났으며 140개 중 133개가 적재함에 온전히 이송되었다. 수거되지 못한 마늘 입자는 7개로 3개는 롤러의 충격에 의해 외부로 이탈하였으며 4개는 Fig. 42에 나와 있듯이 마늘 수확기의 구석 공간에 위치하여 이송이 이루어지지 못하게 된 것으로 파악되었다. 마늘이 기계수확 과정에서 걸려서 더 이상 움직이지 않게 되는 구조적 결함이 있는 것으로 해석될 수 있으며 마늘 입자만으로 분석한 결과이지만 구조 개선은 필요할 것으로 판단된다.



**Fig. 42** Not harvested garlic particles after mechanical harvesting

이송 시간은 1.686 초로 나타났으며 이는 첫 번째 롤러의 y 방향 위치에서부터 적재함의 수확기 쪽 면의 y 방향 위치까지 움직이는데 평균적으로 걸린 시간을 의미한다. Fig. 43에 마늘의 y 방향 거동이 나타나있으며 마늘 수확기 전체가 등속도로 움직이고 있는 상황에서 마늘이 수확기 앞부분에서 생성된 다음 적재함 방향으로 이송되고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 그래프 상에서 소요시간을 파악해볼 수 있다.

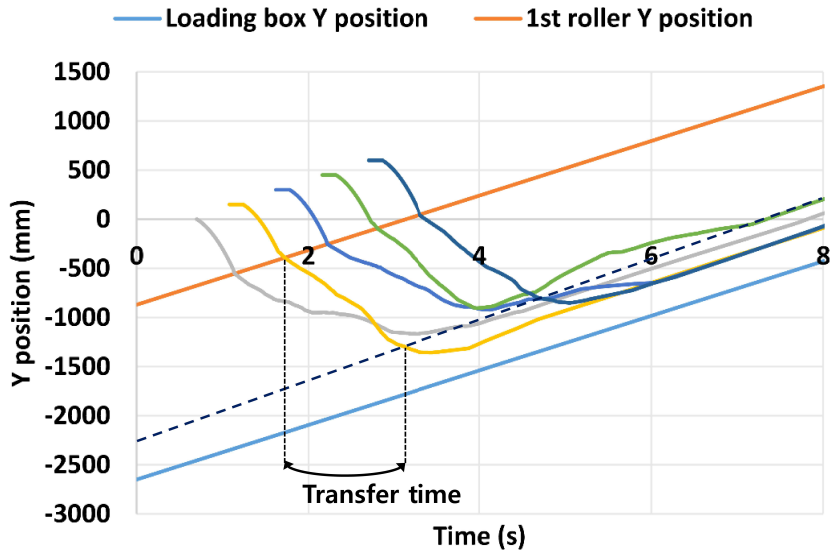
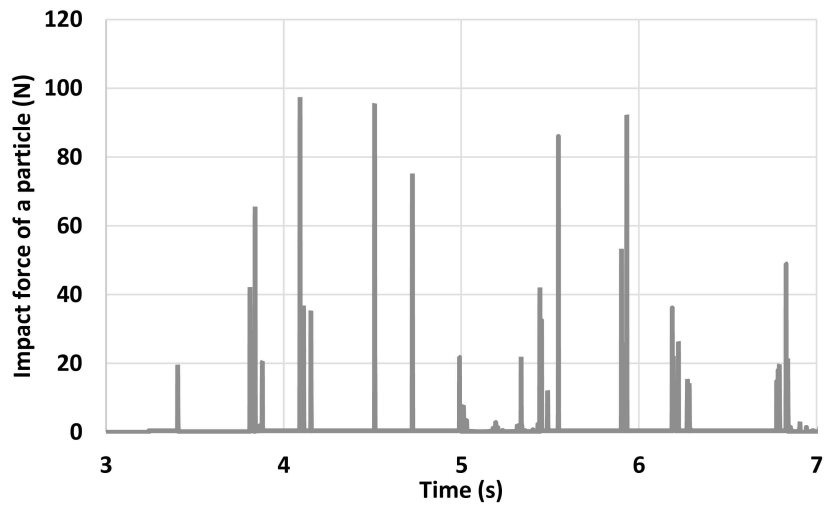
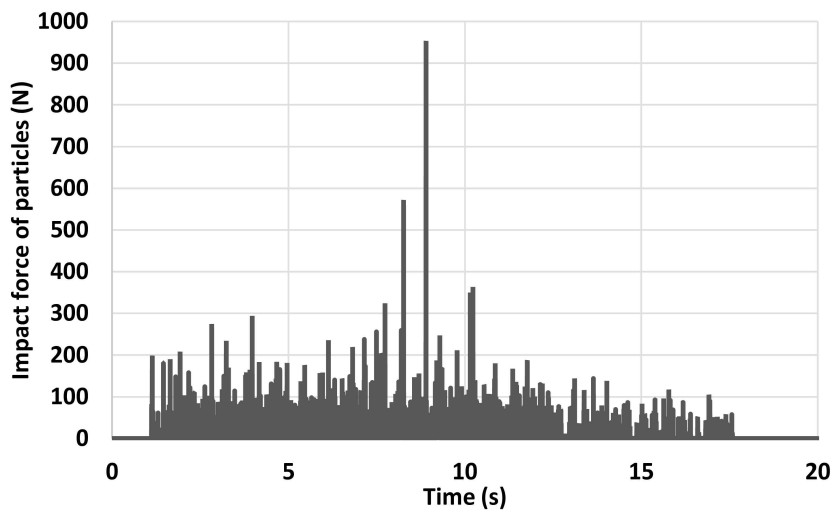


Fig. 43 Behavior of garlic particles and example of transfer time

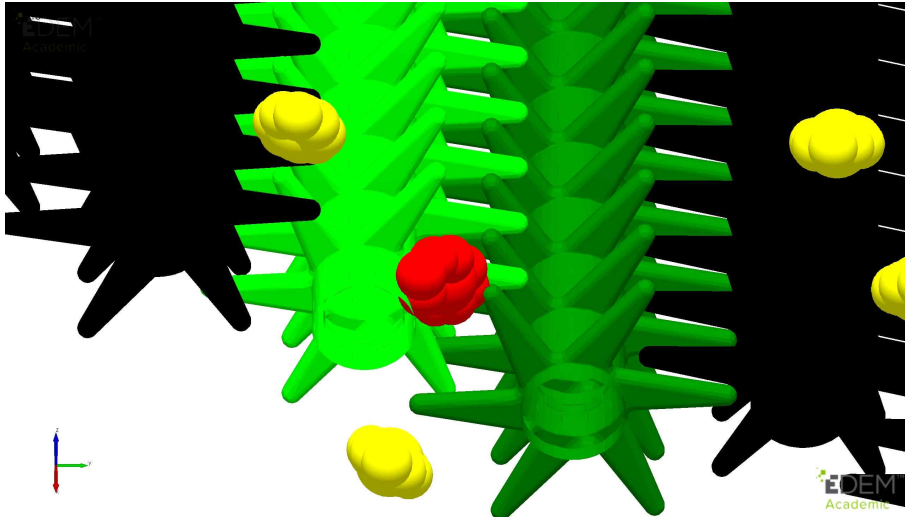
시뮬레이션으로 해석된 기계수확 과정에서 발생하는 평균 충격력은 18.25 N으로 나타났으며 표준편차가 29.14로 크게 나타나 평균값에 비해 상당히 큰 충격도 발생했던 것을 알 수 있다. 최대 충격력은 952.09 N에 달한다. 하나의 입자에 대한 기계수확 과정에서 발생한 충격력은 Fig. 44와 같이 확인할 수 있다. 이송 과정에서 여러 번의 충돌이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 45에는 기계수확 과정에서 전체 마늘 입자들에게 가해진 충격력을 나타내었다. 이러한 데이터를 바탕으로 큰 충격이 어느 시점에 발생했는지를 쉽게 찾을 수 있을 것으로 판단되었다. 가장 큰 충격력이 나타난 순간은 8.9초였으며 그 순간은 Fig. 46과 같이 마늘이 롤러 사이에 끼이는 상황으로 나타났다. 그러나 EDEM의 해석 한계로 인해 롤러의 변형이 없으므로 나타난 상황이며 실제로는 900N이상의 큰 힘이 발생하기 이전에 고무 롤러의 변형으로 마늘이 이탈하기 때문에 손상은 많지 않을 것으로 예상된다.



**Fig. 44** Result of impact force analysis on a garlic particle

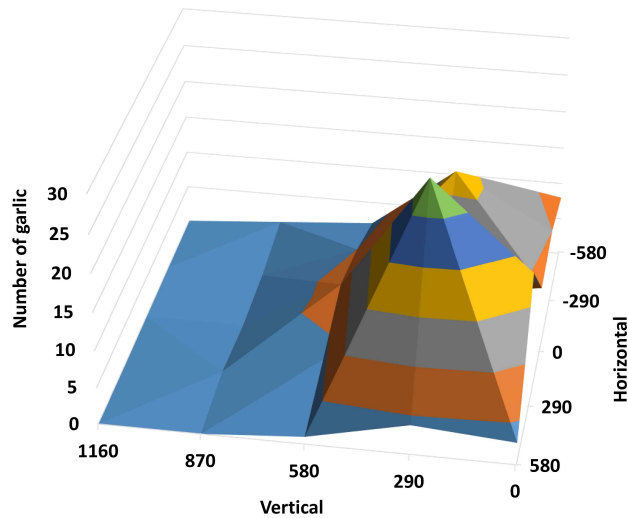
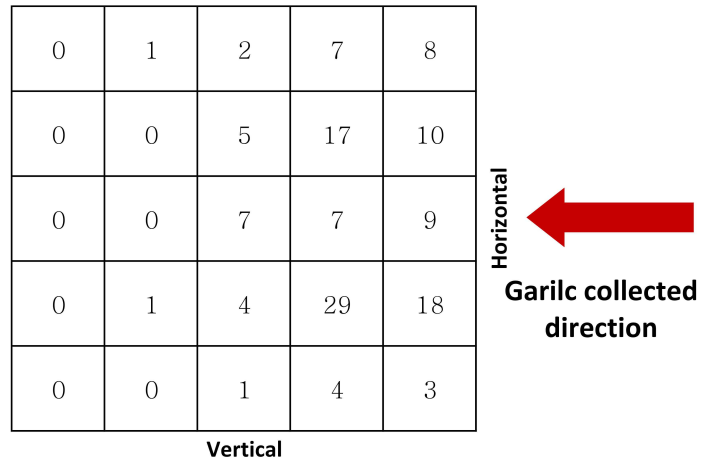


**Fig. 45** Impact force during mechanical harvesting with only garlic under test condition



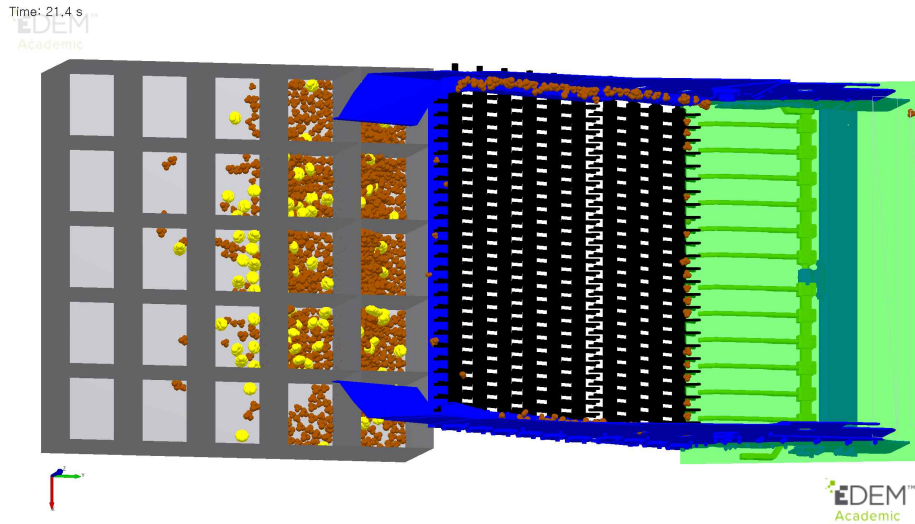
**Fig. 46** Situation with high impact force of garlic particle in the simulation

적재함에 이송이 완료된 133개의 마늘이 적재함 내 위치하는 곳을 파악하고자 입자의 분포를 Fig. 47과 같이 나타내었다. 마늘 수확기에서 가장 먼 1열 칸까지는 도달하지 못한 것으로 나타났다. 그리고 마늘을 모으기 위한 가이드가 있어서 주로 2행과 4행에 모이는 것으로 파악되었다. 수확된 마늘을 쉽게 수거하기 위해서는 분포를 집중시켜야 하며 이를 위해서는 가이드 구조를 개선하도록 해야 할 것이다.



**Fig. 47** Harvested garlic distribution map with only garlic under test condition

마늘 입자와 함께 토양 입자도 공급하는 테스트 조건의 수확 시뮬레이션은 21.4초에 대해 시행되었다. 토양을 포함한 마늘 기계수확 시뮬레이션이 완료된 상태의 적재함을 보면 Fig. 48과 같이 토양과 마늘이 혼합되어 있는 것을 알 수 있다. 토양이 혼합된 기계수확 과정 시뮬레이션을 분석한 결과는 Table 13에 정리하였다.



**Fig. 48** View of harvested garlic in a loading box with garlic and soil under test condition

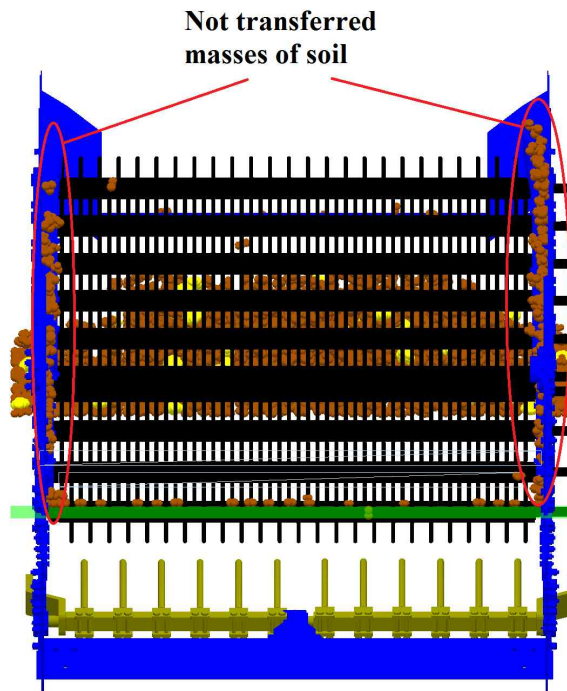
**Table 13** Result of mechanical harvesting simulation with garlic and soil under test condition

Term	Mean (std dev.)
Harvesting rate (%)	94.29 (132/140)
Transfer time (s)	1.893 (0.5213)
Impact force of garlic (N)	17.70 (23.10)
Maximum impact force (N)	223.21
Soil removed rate (%)	55.20 (33.12/60)

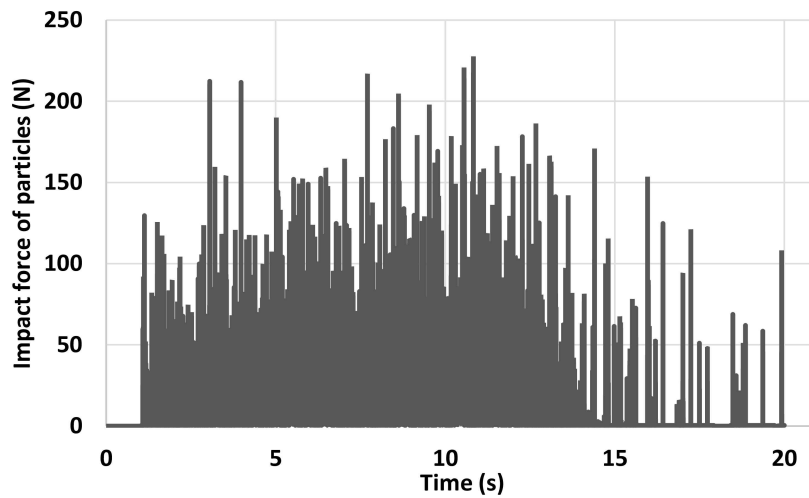
분석된 결과를 앞선 토양이 포함되지 않은 수확 시뮬레이션 결과와 비교하도록 하였다. 수확률은 95%에서 94.29%로 약간 감소하였으나 큰



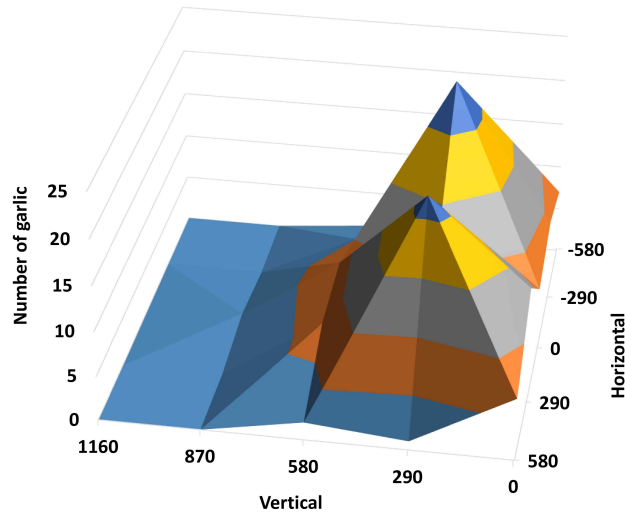
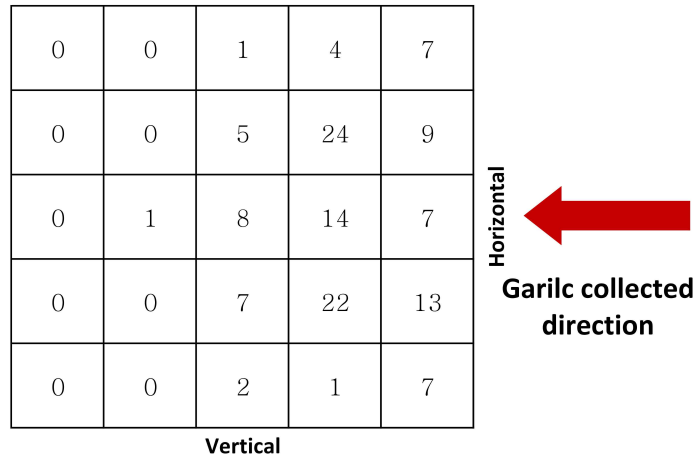
의미를 보이지는 않는 것으로 판단된다. 다만 수확되지 않은 마늘 입자들은 모두 물러와의 충돌에 의해 이탈한 것으로 마늘 수확기에 정채된 것은 나타나지 않았다. Fig. 49를 통해 볼 수 있듯이 측면에 토양이 쌓여 있는 것이 확인되었다. 이송 시간의 경우 1.686초에서 1.893초로 12%정도 증가한 것으로 나타났다. 평균 충격력은 18.25 N에서 17.70 N으로 3%가량 감소하였고 최대 충격력은 1/4수준인 223.21 N으로 감소한 것으로 나타났다. 토양이 섞여있어 전반적으로 이송이 느려졌지만 완충 역할을 해 충격은 줄어든 것으로 보인다. Fig. 50에는 전체 수확 과정에서의 충격력을 나타내었으며 충격이 꾸준히 발생하였고 후반에는 충격이 점차 감소하는 것으로 나타났다. 총 생성된 토양 입자 60kg 중 26.88kg은 적재함에 담긴 것으로 해석되었고 토양 제거율은 55.20%로 나타났다. 절반이 약간 넘는 정도의 토양만 제거된 것으로 나타났다. 그러나 시뮬레이션에서 구현한 토양은 실제 마늘수확기 수확작업 후 마늘과 함께 수거되었던 크기가 상대적으로 큰 토양이었다. 이보다 작은 토양들은 더 큰 비율로 제거될 것이며 환경에 따라 차이는 있지만 토양의 비율이 높지는 않기 때문에 이 정도의 제거율로도 실제로 수확된 마늘에 포함된 토양의 양은 많지 않을 것으로 예상된다. Fig. 51에서는 토양과 수확된 마늘의 분포를 확인할 수 있으며 이전 시뮬레이션 결과보다 상하 대칭적인 분포 결과가 나타났다.



**Fig. 49** Not transferred soil particles after mechanical harvesting



**Fig. 50** Impact force during mechanical harvesting with garlic and soil under test condition



**Fig. 51** Harvested garlic distribution map with garlic and soil under test condition

#### 4.3.2 필드 조건에서의 요인별 수확 성능 결과

토양을 공급하는 조건이 아닌 실제 밭과 같이 토양과 마늘을 배치해두고 마늘 수확기 구조물이 지나가면서 기계수확을 하는 방식의 시뮬레이션이 수행되었으며 결과 해석을 통해 성능을 분석하였다. 그

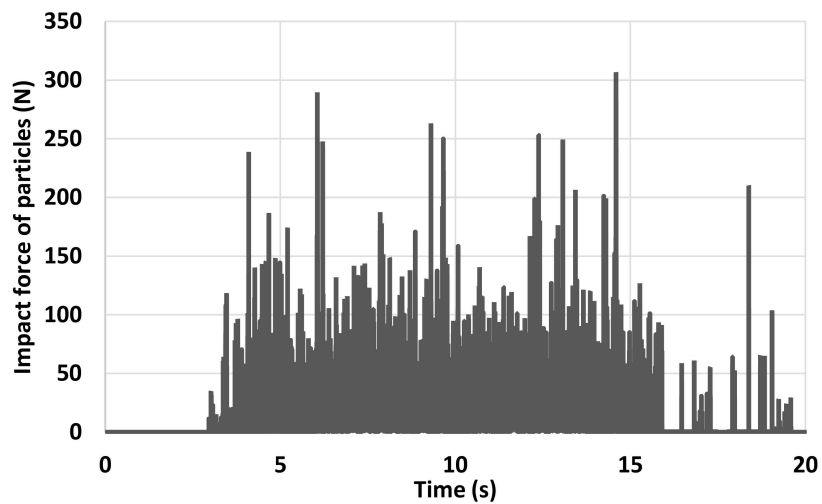
결과는 Table 14에 동일한 양식으로 정리하였다.

**Table 14** Result of mechanical harvesting simulation under field condition

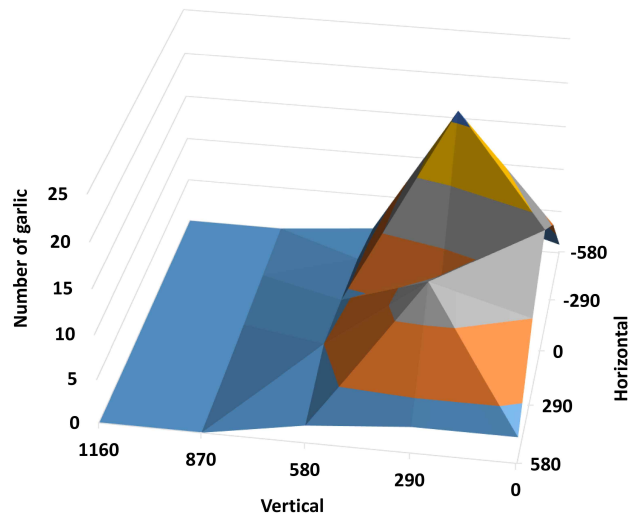
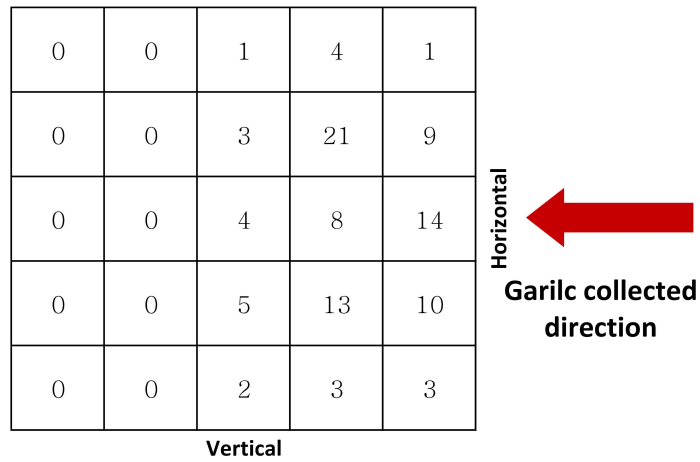
Term	Mean (std dev.)
Harvesting rate (%)	72.14 (101/140)
Transfer time (s)	2.815 (1.373)
Impact force of garlic (N)	16.94 (23.12)
Maximum impact force (N)	299.52
Soil removed rate (%)	63.87 (38.32/60)

이전의 입자를 공급해주는 방식과 비교하여 수확률은 20%p이상 감소하였고 이송 시간도 1초 이상 증가하였다. 시뮬레이션 구조의 큰 차이점은 입자를 공급해주는 경우 롤러와 바로 충돌하여 이송이 시작되지만 발과 같이 구성되어 마늘과 토양을 직접 굴취하면서 작업이 이루어지는 경우 굴취날에 의해 입자들이 밀리고 진동봉에 의해 흩어지게 된다. 전반적으로 롤러에 의해 바로 마늘의 이송이 이루어지지 않고 밀리면서 누적되게 된다. 이러한 과정에서 롤러 아래의 공간으로 빠져나가 수확되지 못하는 마늘 입자들도 발생하게 되고 이송도 더더지는 것으로 해석되었다. 토양과 함께 공급해주는 테스트 조건 시뮬레이션 결과와 비교해 평균 충격력은 감소하였지만 최대 충격력은 증가하여 기계수확 과정에서의 충격은 해석 환경이 일부 달라도 유사하게 해석되는 것으로 판단되었다. Fig. 52를 통해 확인할 수 있는 기계수확 과정에서의 충격력을 보아도 이전과 비슷한 충격력들이 주로 관찰되었다. 마늘에 가해지는 충격을 실제로 측정해보기 위한 실증

시험은 야외가 아닌 테스트 환경에서 이루어져도 적절한 것으로 예상된다. 토양 제거율이 55.20%에서 63.87%로 증가한 것으로 보아 토양의 누적 현상으로 인해 토양이 마늘과 같이 이송되는 경우는 감소한 것으로 보인다. Fig. 53에 나타난 수확된 마늘의 분포도는 이전 해석 결과와 별다른 차이가 없는 것으로 나타났다.



**Fig. 52** Impact force during mechanical harvesting under field condition



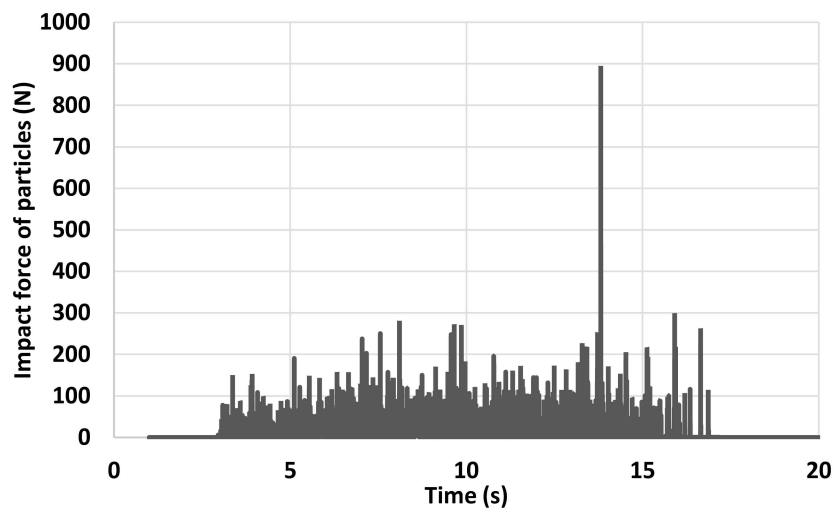
**Fig. 53** Harvested garlic distribution map under field condition

마늘의 기계수확을 더 원활히 할 수 있을 요인으로 고려되는 롤러의 회전속도를 300 rpm으로 상승시켜 마늘 밭과 같은 조건으로 수확 시뮬레이션을 수행하였으며 Table 15의 결과를 얻었다. 롤러 회전속도를 수정하지 않았던 이전 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때 수확률과 토양 제거율의 차이가 크게 발생하였다. 롤러 회전속도가 빨라져 롤러에 의한

충격이 커질 것을 예상할 수 있다. 충돌에 의해서 밖으로 이탈하는 경우가 증가하여 수확률이 감소하게 되었다. 이러한 문제는 수확기 상부에 덮개를 장착하여 보완될 수 있을 것이다. 마늘 이송시간의 경우에는 약간 증가하여 이송이 빨라지는 효과는 확인되지 않았다. 더 빨라진 롤러 회전속도의 기계수확 과정에서 받은 충격력은 Fig. 54에 나타내었다. 최대값으로 나타난 892.98 N의 충격력은 그래프 상에서 독특하게 한 번 발생하였으며 그 이외에는 고르게 발생하였고 기본 롤러 회전속도일 때의 충격력과 차이가 발생하지 않았다. 토양 제거율은 12%p나 감소한 것으로 나타났다. 빨라진 롤러의 회전속도 때문에 롤러 사이로 토양이 제거되기 전에 적재함까지 빠르게 이송되어 버리는 것으로 확인되었다. 롤러 회전속도를 빠르게 하였으나 성능은 향상되지 않은 것으로 해석된다. 개선을 위해서는 영향을 줄 수 있는 다른 요인을 고려해보아야 할 것이다. Fig. 55를 통해 수거된 마늘의 분포를 보면 원래 2, 4열에 몰려있던 마늘이 3열에도 수거되면서 고르게 모이는 것으로 나타났다.

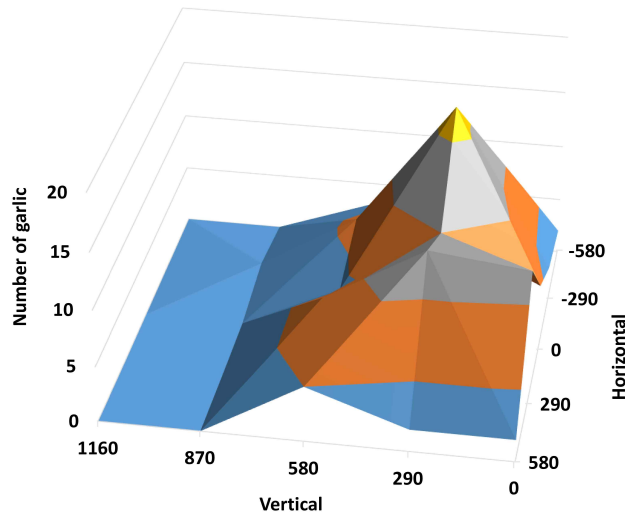
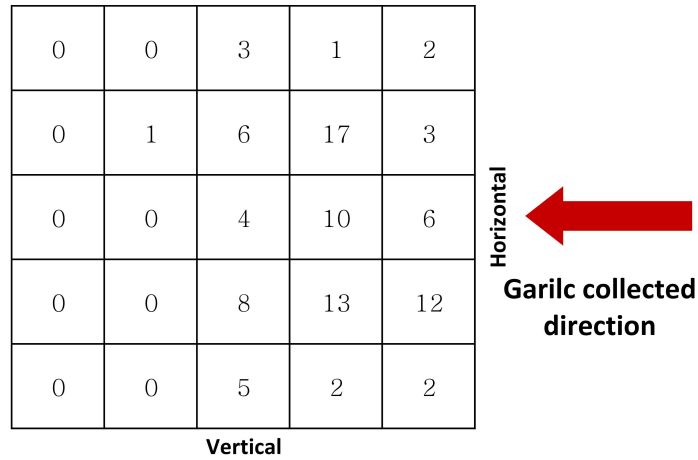
**Table 15** Result of mechanical harvesting simulation with increase of roller rotational speed

Term	Mean (std dev.)
Harvesting rate (%)	67.86 (95/140)
Transfer time (s)	2.940 (1.139)
Impact force of garlic (N)	16.12 (25.61)
Maximum impact force (N)	892.98
Soil removed rate (%)	51.63 (30.98/60)



**Fig. 54** Impact force during mechanical harvesting with increase of roller rotational speed





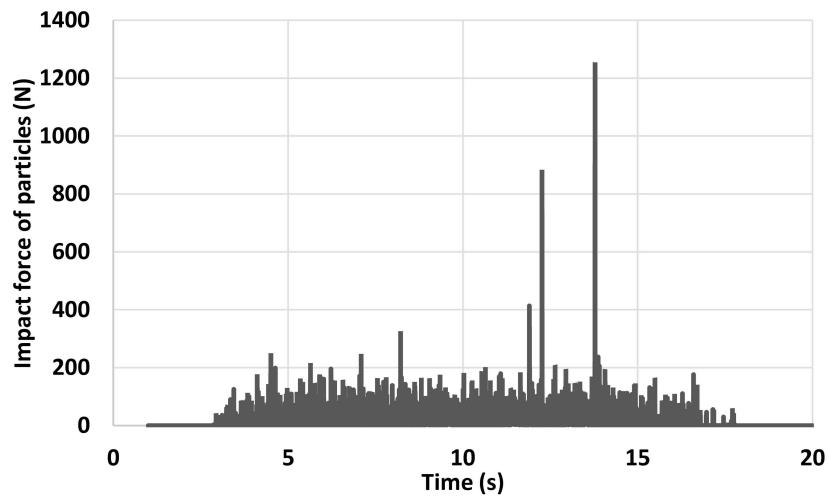
**Fig. 55** Harvested garlic distribution map with increase of roller rotational speed

물성을 측정하고 시뮬레이션의 변수로 입력하여 검증한 결과에서 반발계수가 측정값보다 적게 나타나 실제와 더 유사하도록 반발계수를 상승시켜 시뮬레이션을 수행하고 성능을 파악하였다. 해석된 성능 관련 수치는 Table 16에 정리했다. 낮은 반발계수가 적용된 시뮬레이션 해석 결과와 비교하여 수확률과 토양 제거율이 더 증가하였으며 이송시간도

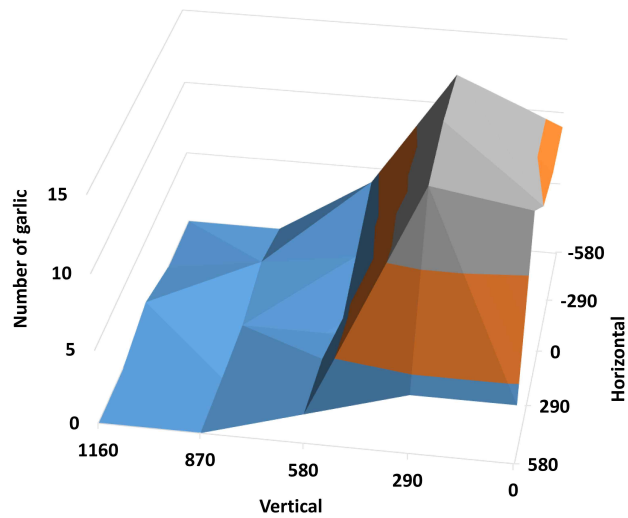
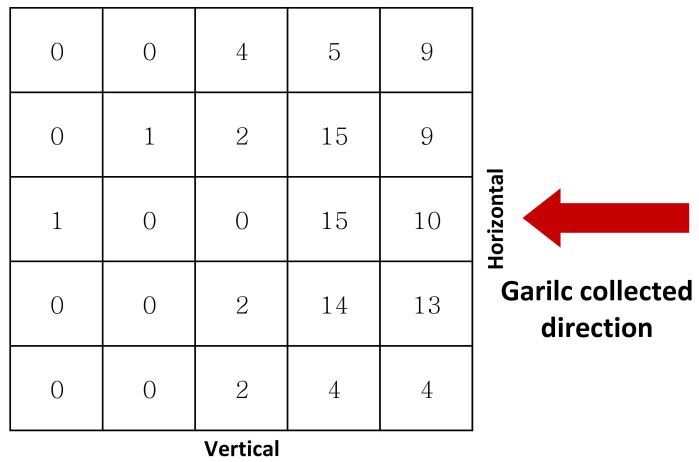
증가한 것으로 나타났다. Fig. 56에 나타난 기계수확 과정 중 마늘에 가해지는 충격력을 이전과 비교하면 큰 충격력이 일부 발생한 것으로 나타났다. 작동요인인 롤러 회전속도의 영향은 크지 않았지만 재료의 물성인 반발계수를 증가시키니 한 번 충돌할 때 더 센 충격이 가해지는 것으로 볼 수 있다. 평균 충격력도 15%가량 증가하였다. 다만 이송 시간이 증가하여 충격이 커지면서 이송에 방해가 있었던 것으로 보인다. 수확된 마늘 입자의 분포는 Fig. 57에서 확인할 수 있으며 가이드에 의해 이송되는 공간에 고르게 퍼져서 수거된 것을 확인할 수 있다. 롤러의 탄성계수를 증가시키는 것으로 전반적인 수확 성능이 개선될 수 있다는 해석 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 16** Result of mechanical harvesting simulation with increase of coefficient of restitution of roller

Term	Mean (std dev.)
Harvesting rate (%)	78.57 (110/140)
Transfer time (s)	3.757 (1.976)
Impact force of garlic (N)	19.50 (31.52)
Maximum impact force (N)	1253.96
Soil removed rate (%)	65.37 (39.22/60)



**Fig. 56** Impact force during mechanical harvesting with increase of coefficient of restitution of roller



**Fig. 57** Harvested garlic distribution map with increase of coefficient of restitution of roller

## 5. 결론

본 연구에서는 밭농업 기계화를 위한 마늘 수확기 개발 연구의 일부분으로 이산요소법을 활용하여 마늘 수확기의 기계수확 과정에서 나타나는 마늘의 거동을 시뮬레이션하고 해석결과를 분석하였다. 시뮬레이션은 재료의 물성에 기초하여 해석 모델에 따라 결과를 도출해내기 때문에 해석에 필요한 재료들의 물성을 조사하고 EDEM 프로그램 내에서 물성 값에 따른 해석 결과를 파악하여 시뮬레이션의 적용성을 평가하는 과정이 선행되었다.

이산요소법 해석에 요구되는 물성으로는 형상 및 크기, 밀도와 푸아송비, 탄성계수, 반발계수, 마찰계수가 있다. 각각의 물성을 측정하는 실험을 마늘 샘플 및 마늘 수확기 구성품의 재질인 강철과 고무에 대해 수행하였고 시뮬레이션의 입력 변수 수치들이 도출되었다. 그리고 이러한 물성 값이 시뮬레이션에 적용되었을 때 원하는 거동 해석이 이루어지는지 파악하기 위해 물성 측정 실험을 시뮬레이션에서 재현하여 검증하도록 하였다. 탄성계수와 정지마찰계수의 경우 입력한 물성 값과 동일한 해석 결과가 나왔으나 반발계수는 해석과정에서 줄어드는 현상이 보였으며 운동마찰계수는 크게 나타나는 것으로 나타났다. 마늘 모형을 이용한 롤러와의 충돌 현상 해석 검증은 가속도 측정과 거동 분석으로 이루어졌다. 가속도계로 측정한 충돌 가속도와 EDEM에서 접촉력 해석으로 구해지는 가속도에는 차이가 존재해 검증에 적절하지 않았으며 충돌 후 마늘 모형의 거동은 고속카메라로 확인한 실제 움직임과 시뮬레이션 된 움직임이 유사한 것으로 확인되었다.

마늘과 토양, 마늘 수확기를 EDEM 내에서 구현하고자 입자 모델을 고안하고 마늘 수확기의 3차원 설계 도면을 이용해 3개의 파트(본체 구조, 진동봉, 롤러 축)를 설계하였다. 마늘 수확기 기계수확 과정의 메커니즘을 실제와 유사하게 나타내고자 작업 조건을 참고하여 시뮬레이션 내에

서 구조물들의 움직임도 동일하게 구현되었다. 이렇게 구현된 마늘 수확기의 기계수확 과정을 해석해내고 성능을 평가하기 위하여 테스트 조건에서 마늘만 공급하는 상황, 마늘과 토양을 같이 공급하는 상황, 그리고 실제 밭과 같이 마늘의 파종 양식대로 마늘이 배치되고 토양이 덮인 입자 시스템에 대해 수확 작업을 하는 상황을 설계하고 각각 해석하였다. 해석을 통해 수확률, 이송시간, 충격력, 적재분포도, 토양 제거율을 파악할 수 있었다.

마늘과 토양을 공급해주는 테스트 조건에 대한 결과로 수확률은 94.29-95.00%, 이송시간은 1.686-1.893초, 평균 충격력은 17.70-18.25 N으로 나타났으며 마늘만 공급된 조건과 비교해 토양이 혼합된 조건에서 이송이 오래 걸리고 충격은 감소하는 것으로 나타났다. 토양이 방해물이자 완충재 역할을 수행하는 것으로 판단되었다. 마늘밭 조건으로 해석하면 토양이 밀리는 현상이 발생하며 이로 인해 수확률은 낮게 나타났고 이송시간은 더 길게 나타났다. 성능을 측정하기 위한 실험 방식에 따라서도 결과는 다르게 나타날 수 있고 사용자 입장에서 성능을 비교하기 위해서는 상세한 성능 평가 조건이 규정되어야 할 것으로 보인다. 수확기의 작동요인인 롤러 회전속도를 증가시켰을 때에는 수확률과 토양제거율 등의 성능 지표가 오히려 낮아지는 결과가 나타났다. 재료의 물성인 롤러의 반발계수를 증가시켰을 때에는 수확률은 8.19%가 증가하고 토양제거율은 2.35%가 증가하여 반발계수가 더 높은 재료를 사용하였을 때 성능 개선 효과가 있을 것으로 판단되었다.

본 연구를 통해 이산요소법 시뮬레이션의 결과로 마늘 수확기의 기계수확 과정에서 마늘 거동을 분석하여 기존에 실험적으로 측정되던 수확 성능 지표를 포함하여 더 상세한 성능을 도출해낼 수 있었다. 그리고 EDEM 프로그램 내에서 물성을 수정하고 해석한 결과를 통해 수확기 롤러의 회전속도와 반발계수를 향상시키는 것으로 수확 성능이 빨라지거나 손상이 줄어드는 방향으로 개선될 수 있음을 예측할 수 있었다. 더욱 정

확한 시뮬레이션 결과를 얻어내기 위해서는 물성 및 작업 환경 조사, 시뮬레이션 입력 변수를 위한 물성 측정 실험, 시뮬레이션 결과를 검증하기 위한 실증 시험 구현 등이 추가적으로 이루어지면서 보완되어야 할 것이다. 그리고 연구에서는 활용되지 않았지만 이산요소법 시뮬레이션으로 얻어지는 데이터가 다양하고 수정할 수 있는 요인들도 많기 때문에 이를 활용할 수 있는 시뮬레이션 설계와 상세 결과 해석 방안에 대한 향후 연구가 이루어 질 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- Choi, J. K. 2017. Finite element method for structural analysis (2nd Edition). Seoul: BooksHill. (in Korean)
- Choi, Y., Hong, J. T., Jun, H. J., Kim, Y. K., Choi, I. H., Kim, J. D., & Yoo, S. N. 2004. Development of harvester for seed garlic produced from bulbils. Proceedings of KSAM Conference, 9(2), 169-173. (in Korean)
- DEM Solutions. 2018. EDEM 2018 documentation. Available at: <https://www.edemsimulation.com/edem-2018-0-documentation/>
- Dintwa, E., Van Zeebroeck, M., Ramon, H., & Tijskens, E. (2008). Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit. Postharvest Biology and Technology, 49(2), 260-276.
- FACT. 2018. Publication of certification result. Available at: <http://www.aminfo.or.kr/front/machinecatalog/machineCatalogAction.do?method=testResultList&gid=catalogue&sid=13>
- Grima, A. P., & Wypych, P. W. 2011. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling. Granular Matter, 13(2), 127-132.
- González-Montellano, C., Fuentes, J. M., Ayuga-Téllez, E., & Ayuga, F. 2012. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations. Journal of Food Engineering, 111(4), 553-562.
- Hacıseferoğulları, H., Özcan, M., Demir, F., & Çalışır, S. 2005. Some nutritional and technological properties of garlic (*Allium sativum* L.).



- Journal of food engineering, 68(4), 463-469.
- HADA. 2018. Products catalog. Available at: [http://hada-korea.com/board/free/read.html?no=81&board\\_no=7#none](http://hada-korea.com/board/free/read.html?no=81&board_no=7#none)
- Hong, J. H., Kim, J. H., & Koh, H. K. 2000. Physical properties of garlic. Agricultural Mechanization in Korea, 201-206. (in Korean)
- Jun, H. J., Hong, J. T., Park, W. J., Choi, Y., & Kim, Y. K. 1999. A fundamental study for developmnet of garlic and onion harvester. Proceedings of KSAM Conference, 4(2), 71-76. (in Korean)
- Kang, T. G., Jun, H. J., Choi, Y., Choi, I. S. & Choi, D. K. 2014. Field performace evaluation of onion harvester. Proceedings of KSAM Conference, 19(2), 87-88. (in Korean)
- Kim, C. G. 2018. Agricultural outlook 2018 Korea. Naju: Korea Rural Economic Institute. (in Korean)
- Kruggel-Emden, H., Wirtz, S., & Scherer, V. 2008. A study on tangential force laws applicable to the discrete element method (DEM) for materials with viscoelastic or plastic behavior. Chemical Engineering Science, 63(6), 1523-1541.
- Leblicq, T., Smeets, B., Ramon, H., & Saeys, W. 2016. A discrete element approach for modelling the compression of crop stems. Computers and electronics in agriculture, 123, 80-88.
- Lee, J. M. 2015. Vegetable sciences crop details. Seoul: Hyangmunsa. (in Korean)
- Lee, J. M., & Ahn, T. S. 2017. A study on utilization status of agricultural

- machinery and farm mechanization rate in 2015 (Project number PJ011755). Jeonju: Rural Development Administration. (in Korean)
- Lee, M. H., Kim, T. H., Cho, Y. J., and Kim, D. C. 2018. Particle behavior analysis of garlic according to the roller rotational speed of conveying unit in garlic harvester using EDEM software. Proceedings of the KSAM Conference, 23(2), 25. (in Korean).
- Lee, S. Y., & Min, Y. B. 2015. Performance analysis of prototype onion stem cutter for harvest mechanization. Proceedings of KSAM Conference, 20(1), 17-18. (in Korean)
- Lim, J., Kim, M. H., Kim, S. M., Choe, J. S., Inoue, E., Okayasu, T., & Kim, D. C. 2016. Transport performance simulation of separating system for self-propelled peanut harvester using edem software. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 61(2), 361-365.
- Min, Y. K., & Jeong, H. S. 1997. Compression and decompression properties of some vegetables. Korean Journal of Food Science and Technology, 29(2), 266-272. (in Korean)
- Nam, J. S., Byun, J. H., Kim, T. H., Kim, M. H., & Kim, D. C. 2018. Measurement of mechanical and physical properties of pepper for particle behavior analysis. Journal of Biosystems Engineering, 43(3), 173-184.
- NIAE. 2006. Integrated mechanization in garlic production: structure and usage of garlic production agricultural machine (Publication number 11-1390242-000031-01). Suwon; Rural Development Administration, National Institute of Agriculture Engineering. (In Korean)
- Nongsaro. 2017. Crop technical information-Garlic-Varieties-Daeseo. Available

at: <http://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psb/psbk/kidofcomdtyDtl.ps?menuId=PS00067&kidofcomdtyNo=27211>

- Noh, K. M., Chang, Y. C., & Park, J. G. 1999. A fundamental study for developing a garlic harvester(Ⅰ) - physical properties of live garlic at the harvesting season. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery*, 24(1), 1-8. (in Korean)
- Owen, P. J., & Cleary, P. W. 2009. Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM). *Powder Technology*, 193(3), 274-288.
- Park, W. K., Choi, D. K., & Kim, Y. K. 2001. Development of a garlic clove planter (Ⅰ) - survey for planting condition and physical properties of garlic clove. *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery*, 26(6), 495-502. (in Korean)
- RDA. 2014. Garlic growing agricultural techniques 117 (Publication number 11-1390000-003768-01). Jeonju: Rural Development Administration. (in Korean)
- Rumsey, T. R., & Fridley, R. B. 1977. Analysis of viscoelastic contact stresses in agricultural products using a finite-element method. *Transactions of the ASAE*, 20(1), 162-167.
- Souza, V. H. S., Santos, A. A. R., Costa, A. L. G., Santos, F. L., & Magalhães, R. R. 2018. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee branch based on finite element analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 150, 476-483.
- UL. 2018. Polylactic Acid (PLA) Typical properties. Available at: <https://plas>

tics.ulprospector.com/generics/34/c/t/polylactic-acid-pla-properties-processing

- Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Dintwa, E., Kafashan, J., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. 2006a. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: model building and validation of DEM to predict bruise damage of apples. *Postharvest Biology and Technology*, 41(1), 85-91.
- Van Zeebroeck, M., Tijskens, E., Dintwa, E., Kafashan, J., Loodts, J., De Baerdemaeker, J., & Ramon, H. 2006b. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: case study of vibration damage during apple bulk transport. *Postharvest biology and technology*, 41(1), 92-100.
- Wojtkowski, M., Pecun, J., Horabik, J., & Molenda, M. 2010. Rapeseed impact against a flat surface: Physical testing and DEM simulation with two contact models. *Powder Technology*, 198(1), 61-68.
- Yoon, J. H. 2006. Garlic production with integrated mechanization. Suwon: National Institute of Agricultural Engineering. (in Korean)
- Yu, Y., Fu, H., & Yu, J. 2015. DEM-based simulation of the corn threshing process. *Advanced Powder Technology*, 26(5), 1400-1409.



## **Abstract**

# **Dynamic Analysis of Garlic Behavior during Mechanical Harvesting Procedure using Discrete Element Method**

Donghyeok Park

Major in Biosystems Engineering

Department of Biosystems & Biomaterial Science and Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Garlic is widely consumed as the main seasoning vegetables in Korea, but the burden of garlic farming is increasing due to lack of manpower caused by the aging in rural society. In addition, since the mechanization rate of garlic farming is still low, it is necessary to develop a garlic harvester to replace manpower. In the previous process of developing agricultural machinery, structural analysis using finite element method was mainly performed. However, performance analysis of harvesting process could not be performed in this way. It is also important to make sturdy machines, but farmers' interest in how well garlic is harvested when they use a machine has been growing, so analysis of harvesting performance is increasingly required. In this study, the behavior of garlic during mechanical harvesting was analyzed by EDEM program with discrete element method(DEM) and simulation was performed to derive the harvesting performance.

To analyze the system using DEM, the object to be analyzed as particles and other structures should be modeled. Garlic was composed of the particles to analyze its behavior. The garlic harvester was equally represented as structures and motion was applied with reference to actual design. The physical properties for EDEM include particle size, density, Poisson's ratio, Young's modulus, coefficient of restitution, and coefficient of friction, and the physical properties of garlic was measured. As the physical properties of the organisms were measured, there was a large variation in the results, and when compared with the previous researches, there were differences in the physical properties due to differences in growth environment and variety. However, it was considered that it does not deviate much from the previous one and the measured values were applied to the physical properties of garlic particles for the interpretation.

Whether the similar analysis as the actual measurement experiments was performed when the physical properties obtained through compression, restitution, and friction tests were applied to the simulation were determined for evaluating the applicability of the simulation analysis to the harvesting process. In the process of harvesting with the garlic harvester, it is still difficult to understand the behavior and the impact of the actual garlic and compare with the simulation. Therefore, the comparison of collision phenomena between the roller and the garlic was also performed. On the whole, adequate analysis results were obtained, but in the case of friction test and collision acceleration, there were large differences in the interpretation, so it is necessary to improve the property measuring test method or the result interpretation method.

As the experimental condition for the performance evaluation by the simulation of the harvesting process, the supply conditions of garlic and soil particles and the harvesting work space were designed by referring to the

actual field conditions. Through the simulation analysis, the harvesting rate, transport time, the impact force of garlic, the harvested garlic distribution, and soil removed rate could be analyzed as the performance of garlic harvester. The comparative analysis about the harvesting performances of the established garlic harvester specifications, the conditions that improved the rotational speed of roller, which is an operating factor, and the condition of improving the coefficient of restitution of the roller, which is a design factor, were performed in the simulations. As a result of the interpretation, the increase of the roller rotational speed caused the decrease of the harvesting rate, but there was a slight effect to reduce the impact, and the increase of the coefficient of restitution of roller raised the transfer time, but the harvesting rate and the soil removed rate could be improved by 8.19% and 2.35%, respectively. In the future, it is expected that the simulation of DEM will contribute to the development of the garlic harvester and the performance improvement through the detailed verification and the evaluation under various conditions.

**keywords : Discrete element method, Dynamic analysis of behavior, EDEM, Garlic harvester, Physical properties of garlic**

***Student Number : 2017-21926***